

CERRADO

SUSTENTABILIDADE, AGRONEGÓCIO E INOVAÇÃO

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis
(Org.)



CERRADO

SUSTENTABILIDADE, AGRONEGÓCIO E INOVAÇÃO

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis
(Org.)

Barreiras, Bahia
2024

Instituto JCO

José Cláudio de Oliveira – Presidente
Luciane de Oliveira Miller – Vice-Presidente
Helmuth Kieckhöfer - Diretor

Contatos:

Celular: (77) 99847-8188
Site: <https://www.institutojco.org.br>
E-mail: administrativo@institutojco.org.br

Conselho Editorial**Organizadora**

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis

Adriana Migliorini Kieckhöfer
Ana Maria Mapeli
Jorge da Silva Junior
Maritânia Salete Salvi Rafagnin
Marco Antonio Tamai

Foto da Capa e Contracapa

Rui Rezende Barreto

Diagramação

Uedilson Rodrigues de Castro Júnior

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Cerrado : sustentabilidade, agronegócio e inovação /
organização Alessandra Terezinha Chaves
Cotrim Reis. -- 1. ed. -- Barreiras, BA :
Ed. dos Autores, 2024.

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-01-03817-9

1. Agronegócio - Brasil 2. Biodiversidade
3. Cerrado 4. Manejo florestal sustentável
5. Plantas nativas 6. Recursos hídricos
7. Solo - Conservação 8. Sustentabilidade
ambiental I. Reis, Alessandra Terezinha Chaves
Cotrim.

24-208976

CDD-304.2

Índices para catálogo sistemático:

1. Cerrado : Sustentabilidade ambiental : Ecologia
304.2

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

1ª edição. Publicação digital (2024): PDF. 1ª impressão (2024): 500 exemplares.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer meio ou forma sem a prévia autorização do Instituto JCO. A violação dos direitos autorais é crime estabelecido na Lei nº 9.610, de 19/02/1998 e punido pelo artigo 184 do Código Penal.

Esta publicação pode ser adquirida por meio do site <https://www.institutojco.org.br> e <https://www.jcobioprodutos.com.br/> - Rodovia BR 242/020, KM 802, Nº 8030, Chácara das Candeias - Zona Rural, Barreiras - BA, CEP: 47810-423.

CERRADO

SUSTENTABILIDADE, AGRONEGÓCIO E INOVAÇÃO

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis
(Org.)



SOBRE OS AUTORES

ALESSANDRA TEREZINHA CHAVES COTRIM REIS. Possui Graduação em Ciências Biológicas, Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Mestrado e Doutorado em Botânica, Pós-doutorado com enfoque na Implementação do Código Florestal Brasileiro Lei nº 12.651/2012 em áreas de Cerrado na Bahia, Brasil. Trabalhou no Centro de Recursos Ambientais (CRA), foi docente dos cursos de Engenharia Agrônômica e Ciências Biológicas da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) e Diretora de Meio Ambiente da Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA). Realizou diferentes trabalhos envolvendo florística e fitossociologia em áreas de Cerrado e em áreas de Florestas Estacionais, além de condução de programas voltados a propagação de espécies nativas do Cerrado, restauração de áreas, implementação de Plano de manejo de Unidade de Conservação e regularização ambiental de empreendimentos rurais. Atualmente é Sócia-fundadora da Sustentabili: Planejamento, Projetos e Ações e Assessora de Sustentabilidade na JCO Bioprodutos. Tem mais de 25 anos de experiência na condução de trabalhos na área de Legislação Ambiental, Agronegócio, Compliance, Recursos Hídricos, Vegetação e Florística do Cerrado, Restauração de áreas e elaboração e condução de Programas de Sustentabilidade e Certificações. E-mail: chavescotrim@gmail.com

ANA MARIA MAPELI. Possui Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2002), Mestrado em Ciências Agrárias (Fisiologia Vegetal) pela Universidade Federal de Viçosa (2005) e Doutorado em Ciências Agrárias (Fisiologia Vegetal) pela Universidade Federal de Viçosa (2009). Atualmente é docente da Universidade Federal do Oeste da Bahia. Tem experiência na área de Botânica, com ênfase em Fisiologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: alelopatia, germinação, conservação pós-colheita, crescimento, sementes e longevidade floral. E-mail: mmapeli@ufob.edu.br

ANDREA CARLA CALDAS BEZERRA. Bióloga, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Especialista em Biotecnologia e Bioprocessos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM), Mestre em Fitopatologia com ênfase em Doenças parasitárias de plantas pela Universidade de Brasília (UnB), Doutora em Ciências Biológicas com ênfase em Microbiologia pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Pós Doutorado em Ciências Biológicas (Taxonomia de Microrganismos) pelos Programas de Pós-graduação em Biologia de Fungos e Biologia Vegetal da UFPE. Aperfeiçoamento Profissional em Bioprodutos & Bioprocessos pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atualmente ocupa o cargo de Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento, responsável pelas pesquisas internas na Bioprospecção e desenvolvimento de produtos à base de bactérias na empresa JCO Bioprodutos. E-mail: andrea@jcobioprodutos.com.br

ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA. Possui Graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (1988), Mestrado em Meteorologia pela Universidade Federal da Paraíba (1993) e Doutorado em Ciências Ambientais pela Wageningen University (2008). Trabalhou como pesquisador na Embrapa de 1994 a 2019. Atualmente é professor externo da Universidade Federal de Sergipe, associado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos - PRORH, onde atua com ensino e orientações sobre aplicações de sensoriamento remoto ao meio ambiente. E-mail: heribertoteixeira11@gmail.com

AZIZ GALVÃO DA SILVA JÚNIOR. Professor Titular de Administração Rural do Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Graduado em Agronomia, Mestrado em Economia Rural pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Ph.D em Administração Rural pela Universidade de Bonn (Uni-Bonn), Alemanha. Realizou Pós-doutorados no FoodNetCenter da Universidade de Bonn (Uni-Bonn), Alemanha na área de

sustentabilidade do agronegócio e no Daugherty Global Institute Water for Food da Universidade de Nebraska-Lincoln (DWFI-UNL), USA na área de gestão de recursos hídricos e irrigação. Coordenador do grupo Agro Plus UFV, com projetos nas áreas de sustentabilidade, conectividade rural, gestão de empresas rurais, agricultura irrigada e análises de cadeias de produção no agronegócio. E-mail: aziz@ufv.br

CAMILA ALMEIDA DOS SANTOS. Engenheira Agrônoma, com Mestrado e Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), área de concentração em fertilidade do solo. Durante seu doutorado atuou na Embrapa Agrobiologia em parceria com a Estação Experimental de Zootecnia do Extremo Sul da Bahia (ESSUL), unidade da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Ceplac). Também possui Doutorado Sanduíche pelo programa “The Climate, Food and Farming, Global Research Alliance Development Scholarships Programme (CLIFF-GRADS)”, promovido por uma iniciativa conjunta da Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA) e do Low Emissions Development Flagship (CCAFS). Durante esse período, realizou treinamento técnico-científico com balanço de Gases de Efeito Estufa na Queensland University of Technology, em Brisbane, Austrália. Tem experiência com fertilidade do solo; manejo e conservação do solo; estoque de carbono e nitrogênio no solo; ciclagem de nutrientes; gases do efeito estufa em diferentes sistemas agrícolas; manejo de pastagem, sistemas de produção de bovinos de corte e leite, culturas agrícolas como cana-de-açúcar, milho e soja. Atualmente, é pesquisadora na Fundação Solidaridad como Especialista em Carbono, atuando com agricultura de baixo carbono, sustentabilidade e inclusão social. E-mail: milaema04@gmail.com

EDSON EYJI SANO. Geólogo pela Universidade de São Paulo (USP), mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Ph.D. em Ciência do Solo pela Universidade do Arizona, EUA. É pesquisador sênior da Embrapa Cerrados e professor credenciado nos programas de pós-graduação em Geociências Aplicadas e Ciências Ambientais da Universidade de Brasília (UnB) e Modelagem em Ciências Exatas e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Possui larga experiência na análise e processamento digital de imagens de satélite do Cerrado e da Amazônia para o monitoramento agrícola e ambiental. E-mail: edson.sano@embrapa.br

EDUARDO ANTONIO GOMES MARQUES. Doutor em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa. É Pós-doutor pela Universidade do Porto (2001) e pela The University of Queensland (2014). Publicou vários artigos em periódicos internacionais. Possui livros e capítulos de livro publicados no Brasil e no exterior. Orientou mais de 100 estudantes de mestrado e doutorado nas áreas de Engenharia Civil, Geologia, Geografia, Engenharia Ambiental e Engenharia de Minas. Supervisionou 2 Pós-Doutorados. Foi Chefe do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da mesma universidade. É revisor das Revistas Soil Rocks, Engineering Geology, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Engineering Geology, Journal of Geological Resource and Engineering e Rock Mechanics and Rock Engineering. É membro da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE), da International Association on Engineering Geology and The Environment (IAEG), da International Society for Rock Mechanics (ISRM) e da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Atua na área de Geologia de Engenharia e Geotecnia, com ênfase em Geologia de Engenharia, Cartografia de Risco Geológico-Geotécnico, Mecânicas das Rochas, Cartografia Geotécnica, Estabilidade de Taludes, Hidrogeologia e Meio Ambiente. Tem mais de 30 anos de experiência em Geologia Aplicada à estabilidade de taludes rochosos, mapeamento de risco geológico, mecânica das rochas, hidrogeológica, análise de impactos ambientais, mapeamento e classificação

geomecânica de maciços rochosos em minas a céu aberto e subterrâneas e fundações de barragens. E-mail: eagmarques1965@gmail.com

EDUARDO CARVALHO DA SILVA NETO. Possui graduação em Agronomia, Mestrado e Doutorado em Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Foi professor no Departamento de Solos da UFRRJ, na área de Aptidão Agrícola das Terras, Manejo e Física do Solo. Principais linhas de pesquisa: pedologia, gênese e classificação de solos, carbono, manejo e conservação do solo. Também possui pós-graduação lato sensu em Geologia do Quaternário pelo Museu Nacional - UFRJ, atuando em temas sobre relação solo-paisagem e análise do solo como registro de mudanças climáticas e ambientais. Atualmente é pesquisador no Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS-Rio). Participa de projetos de Divulgação Científica e Educação em Solos e de pesquisas interdisciplinares para sustentabilidade, com ênfase em carbono do solo, etnopedologia, serviços ecossistêmicos e uso sustentável da terra. E-mail: netocseduardo@gmail.com

EVERARDO CHARTUNI MANTOVANI. Engenheiro Agrícola e Mestre pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Doutor em Agronomia pela Universidade de Córdoba Espanha. Iniciou sua carreira de professor na UFV em 1983 no Departamento de Engenharia Agrícola e se aposentou como Professor Titular do DEA-UFV em 2015 e no período de 2015 a 2023 atuou como Professor Sênior Voluntário. É consultor do IMAFIR-MT (Instituto Mato-grossense do Feijão, Pulses, Grãos Especiais e Irrigação) e da AIBA (Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia) onde atua como consultor técnico em projetos desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no estado de MT e na região Oeste da Bahia. Coordena diversos projetos financiados ao longo da sua carreira incluindo o programa de pesquisa sobre disponibilidade de recursos hídricos no Oeste da Bahia (2017-2021 e 2023-2025) e no estado do MT (2022-2026). Criou e coordenou por 20 anos o GESAI (Grupo de Estudos e Soluções para Agricultura Irrigada) - DEA/UFV. Em 2008 criou a empresa Irriplus Tecnologia e Treinamento Ltda dentro da incubadora de empresas tecnológicas da UFV. É o idealizador e criador da empresa IRRIGER, hoje empresa do grupo Valmont. Consultor de várias empresas, desenvolveu um programa de difusão de conhecimento na área de sistemas de irrigação mecanizados em universidades da América Latina em parceria com a Valmont. Orienta atualmente quatro doutorandos do programa de pós-graduação DEA-UFV, tendo já orientado 54 dissertações de mestrado e 28 de doutorado. Publicou cerca de 10 livros, 36 capítulos de livros, 145 artigos em revista com corpo editorial, 395 artigos completos e resumos publicados em anais de congressos e revistas técnicas. Desenvolveu mais de 12 softwares de uso na área de irrigação e recursos hídricos. Medalha da Ordem do Mérito do Ex-Aluno da Universidade Federal de Viçosa (UFV) do ano 2021 concedido pelo Conselho Permanente da Ordem do Mérito do Ex-Aluno da UFV e foi presidente da Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID) no período de 2021-2023. E-mail: everardo@ufv.br

FERNANDA CAETANO DE MATTOS BASTOS CUNHA. Graduada em Geologia, Mestranda pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Trabalhou em diferentes projetos de pesquisa, com destaque para projetos na área de hidrogeologia junto ao HidroGeo, Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ. Possui artigos publicados nas áreas de mineralogia e hidroquímica em diferentes periódicos. Atualmente trabalha como pesquisadora no projeto de Estudo de Inteligência Territorial e Hídrica para o Desenvolvimento Sustentável da Agricultura Irrigada em Mato Grosso. E-mail: cmbcunha@outlook.com

FLÁVIA VIRGÍNIA FERREIRA DE ARRUDA. Graduada em Licenciatura em ciências biológicas pela Universidade Federal de Pernambuco (2007), mestre em Biologia de Fungos pela Universidade Federal de Pernambuco (2011) e doutorado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Pernambuco (2015). Tem experiência na área de Micologia, com

ênfase em Biotecnologia, atuando principalmente nos seguintes temas: controle biológico por fungos, fungos filamentosos, biorremediação e fungos endofíticos. Atualmente é Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento em fungos na empresa JCO Bioprodutos. E-mail: flaviaarruda@jcobioprodutos.com.br

FRANCISCO ASSIS DE OLIVEIRA. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal da Paraíba (1973), Mestrado em Engenharia Civil CCT/UFPB Campina Grande PB pela Universidade Federal da Paraíba (1976) e Doutorado em Agronomia Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo (1983). Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Agronomia, atuando principalmente nos seguintes temas: Irrigação e drenagem, Drenagem de terras agrícolas, Água no sistema solo-planta-atmosfera, hidráulica agrícola, Manejo de irrigação em culturas, Salinidade da água e do solo, Manejo de área salinas, Fertilidade do solo e adubação, Nutrição mineral de plantas, Classificação do solo, Gênese do solo, Uso e manejo do solo, Corretivos do solo. E-mail: 410100110@prof.sempreunifasb.com.br

GEORGE GARDNER BROWN. cursou ciências naturais (agronomia) na Universidade de Wisconsin (1990), realizando o mestrado em solos na Universidade da Geórgia (1993) e o doutorado em ecologia na Université Paris VI-Pierre et Marie Curie (1999). Atualmente é pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Florestas). Publicou (em autoria e coautoria) mais de 120 artigos em periódicos especializados, >65 capítulos de livros, 5 anais de eventos e 3 livros. Participou no desenvolvimento de 1 produto tecnológico. Orientou e coorientou mais de 25 dissertações de mestrado e 11 teses de doutorado nas áreas de ecologia, zoologia, agronomia, solos e bioquímica. Recebeu 15 prêmios e/ou homenagens. Participou em mais de 30 projetos de pesquisa nacionais e internacionais, sendo coordenador de mais de 20 deles. É membro do quadro permanente de professores da pós-graduação em Ciências do Solo da UFPR, onde ministra duas disciplinas e orienta alunos desde 2008. Atua na área de ecologia, com ênfase em ecologia do solo, especialmente minhocas. Em suas atividades profissionais interagiu com mais de 600 colaboradores em coautorias de trabalhos científicos. E-mail: george.brown@embrapa.br

GERSON CARDOSO DA SILVA JUNIOR. Geólogo (UFRJ, 1983), Doutor em Hidrogeologia (Universidade Politécnica de Catalunha, Espanha 1997). Atualmente é Professor Titular e Coordenador do Laboratório de Hidrogeologia no Departamento de Geologia, Instituto de Geociências da UFRJ, atuando como docente na graduação e em Programas de Pós-graduação de Geologia e Meteorologia da UFRJ. Publicou mais de 50 artigos em periódicos indexados nacionais e internacionais. Editor Associado do Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ e Membro do Conselho Consultivo da Revista Brasileira de Águas Subterrâneas. Coordena e/ou participa de várias equipes de projetos científicos no Brasil e exterior. Orientou 36 dissertações de Mestrado e 14 teses de Doutorado já concluídas na área de Hidrogeologia, com mais sete em andamento no presente momento. E-mail: gerson@acd.ufrj.br

GREGORIO GUIRADO FACCIOLI. Graduado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1994), Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Irrigação e Drenagem pela UFV (Universidade Federal de Viçosa) em 1997 e Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração em Irrigação e Drenagem pela UFV em 2002. Professor do Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) da Universidade Federal de Sergipe, professor e orientador do mestrado e Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA/UFS. Publicou cerca de 63 artigos em periódicos, 12 livros, 25 capítulos de livros e 59 trabalhos em congressos. É orientador atual de dois alunos de iniciação científica, três dissertações de mestrado e nove teses de doutorado, tendo concluídas 59 orientações de iniciação científica, 43 orientações de mestrado e 12 orientações de doutorado. Coordenador de diversos projetos de pesquisa financiados por vários órgãos como Ministério das Cidades,

FUNASA, Prefeituras, MI INTERÁGUAS – MIDR, entre outros. Pós-doutorado em Geografia Física realizado na Universidade de Sevilha em 2018/2019 e em 2024. Editor dos periódicos Scientia Plena e Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, é também revisor dos periódicos Pesquisa Agropecuária Tropical, Revista Brasileira de Agricultura Irrigada e Engenharia Agrícola. Bolsista Produtividade modalidade PQ – Nível 2 (2020/2023). E-mail: gregorioufs@gmail.com

HELIAB BOMFIM NUNES. Possui Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade do Estado da Bahia - UNEB (2009), Mestrado em Microbiologia Agrícola pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB (2013) e Doutorado em Agronomia pela Universidade de Brasília – UnB (2018). Atualmente é professor do Centro Universitário Arnaldo Horácio Ferreira (UNIFAAHF) e pesquisador da Fundação Bahia. E-mail: heliabnunes@hotmail.com

INÁCIO PASCOAL DO MONTE JÚNIOR. Possui Bacharelado e Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Mestrado em Biologia de Fungos e Doutorado em Ciências Biológicas, ambos pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente é Coordenador de Pesquisa na área de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) na JCO Bioprodutos. E-mail: inaciopascoal@jcobiodprodutos.com.br

JAMILE DA SILVA OLIVEIRA. Possui graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade do Estado da Bahia – UNEB (2011), Mestrado em Recursos Genéticos pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB (2014) e Doutorado em Agronomia pela Universidade de Brasília - UnB (2018). Atualmente é pesquisadora da Agrocinco/Embrapa. E-mail: jamile.oliveira54@gmail.com

JESSICA CAUANA DE OLIVEIRA SANTANA. Doutora em Botânica pela Universidade de Brasília – UnB (2021), Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal da Bahia - UFBA (2015) e Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal da Bahia – UFBA (2013). Tem experiência como pesquisadora na área de Botânica, atuando principalmente nos seguintes temas: taxonomia de leguminosas, espécies endêmicas e ameaçadas, biogeografia e conservação da flora do bioma Cerrado. Possui artigo científico publicado na revista internacional “Biodiversity and Conservation”, a qual colabora como revisora. É integrante do grupo de taxonomistas, responsável pelo gênero *Tachigali*, no projeto de pesquisa “Flora e Funga do Brasil”, coordenado pelo Jardim Botânico do Rio de Janeiro. E-mail: jessica.stna@hotmail.com

JESSICA DA MATA DOS SANTOS MONTEIRO. Engenheira Agrônoma pela Universidade de Brasília, Mestre e Doutora em Fitopatologia com ênfase em Nematologia de plantas pela Universidade de Brasília em parceria com a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Atuou como Pesquisadora de Pós Doutorado durante 18 meses em Taxonomia integrativa de nematoides do gênero *Meloidogyne* pela Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, e por mais 11 meses em Nematologia de plantas pela Universidade Federal de Goiás. Atualmente é Nematologista, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento na empresa JCO Bioprodutos, atuando como Coordenadora e Supervisora do Laboratório de Nematologia, das estufas e da área de experimentação a campo dessa instituição. É responsável pelas pesquisas internas que visam a busca por microrganismos agentes de biocontrole, passíveis de serem incluídos em programas de manejo integrado de fitonematoides, e pelos ensaios do RET (Registro Especial Temporário) realizados pelas estações experimentais contratadas para avaliar a eficiência e praticabilidade agrônômica de bioprodutos JCO, visando o registro definitivo dos mesmos como bionematicidas. Possui experiência em diversos aspectos da fitopatologia e da nematologia, com ênfase em controle biológico de fitonematoides, e expertise em métodos de diagnóstico de fitonematoides (Taxonomia integrativa), estudos de diversidade e variabilidade

genética com técnicas moleculares, planejamento e execução de testes em diferentes ambientes (*in vitro*, casa de vegetação e campo) visando o manejo de fitonematoides, avaliação de efeitos de bioprodutos na germinação das sementes e na promoção de crescimento de plantas, e treinamento da equipe técnica do campo, do laboratório e de parceiros, bem ministração de palestras em eventos promovidos pela empresa e por parceiros. E-mail: nematologiajco@jcobioprodutos.com.br

JOAQUIM PEDRO SOARES NETO. Possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB (1983), Mestrado em Ciências Agrárias pela Universidade Federal da Bahia - UFBA (1999), Doutorado em Geotecnia pela Universidade de Brasília - UnB (2005) e Pós-Doutorado pela Universidad Politecnica de Cartagena na Espanha - UPCT (2015). Atualmente é professor Pleno da Universidade do Estado da Bahia - UNEB. E-mail: j.pedroneto@yahoo.com.br

JOÃO MARCOS PEREIRA NOVAIS. Engenheiro Agrônomo formado pela Universidade Federal de Mato Grosso, com ênfase em Fertilidade do Solo, adubação e Nutrição Mineral de Plantas. Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical (UFMT), com ênfase em manejo e conservação do solo, estoque de carbono do solo e restauração de áreas degradadas. Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Agricultura Tropical (UFMT), com ênfase em Nematologia Agrícola, utilização e aplicação de resíduos agrícolas, produção e utilização de biochar. Atualmente sou coordenador de pesquisa de campo na área de nematologia, pela empresa JCO Bioprodutos. E-mail: joao.marcos@jcobioprodutos.com.br

JORGE DA SILVA JÚNIOR. Possui graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Lavras - UFLA (2003), é Doutor em Produção Vegetal em Áreas do Cerrado (Fitotecnia) pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU (2019) e Mestre em Fitotecnia pela Universidade Federal de Lavras - UFLA (2006). Atualmente é Supervisor Regional de Vendas Sênior na TIMAC Agro, Consultor administrativo da Agro+ Consultoria e Pesquisas Agrônômicas, e atua na área de pesquisa e docência, e como Professor Pesquisador da UNEB - Campus IX em Barreiras, no Curso de Agronomia. Tem experiência com o Manejo de Carbono e Boas Práticas Agrícolas, Controle de Doenças de Plantas Cultivadas, manejo natural de pragas com extratos vegetais, e outras áreas da Agronomia, com ênfase em Fisiologia de Plantas Cultivadas, Uso e Manejo de Solos, Fertilidade e Nutrição de Plantas, atua principalmente nos temas: Pesquisa Agrícola, docência do ensino superior, e prestação de serviços na área Agrônômica. E-mail: jorsilva@uneb.br

JOSÉ OLÍVIO LOPES VIEIRA JÚNIOR. Bacharel em Agroecologia pelo Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Campus Rio Pomba, MG; Licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Salgado de Oliveira; Mestre em Agroecologia pela Universidade Federal de Viçosa; e Doutor em Produção Vegetal na linha de pesquisa em Nematologia pela Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro (UENF). Atuou como pesquisador (Pós-doutorado) no Laboratório de Micologia da UENF responsável pela coordenação de projetos de pesquisa com fungos endofíticos como promotores de crescimento e indutores de resistência de plantas a patógenos. Atualmente, é coordenador de pesquisa em nematologia na empresa JCO Bioprodutos. E-mail: joseolivio@jcobioprodutos.com.br

LEONARDO DE OLIVEIRA BARBOSA. Graduado em Ciências Agrárias pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre e Doutor em Ciências Agrárias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Atua a mais de 10 anos na condução de pesquisas e desenvolvimento nas áreas de Fitopatologia, Microbiologia Agrícola e Micologia. Atualmente é coordenador de pesquisa na JCO Bioprodutos, conduzindo estudos com o fungo *Trichoderma*, desde a prospecção até o biodesenvolvimento de produtos. E-mail: leonardo@jcobioprodutos.com.br

LINEU NEIVA RODRIGUES. Mestre e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa e Pós-doutor pela Universidade de Nebraska-EUA, Lincoln, em Engenharia de Irrigação e Manejo de Água. Atualmente é pesquisador na área de recursos hídricos e irrigação na Embrapa Cerrados, orientador dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e da Faculdade de Ciências Agrônômicas - Câmpus de Botucatu e vice coordenador da Seção I (Água e Terra), da Comissão Internacional de Agricultura e Engenharia de Biosistemas. Foi representante do Brasil na Plataforma de Recursos Hídricos e Tecnologia de Irrigação do PROCISUR. E-mail: lineu.rodrigues@embrapa.br

MÁRCIA GABRIEL. Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal de Santa Maria (RS), Tecnóloga em Agronegócio pela Universidade Regional Integrada (URI), campus Frederico Westphalen (RS), Mestre em Agronomia na área de Agricultura e Ambiente com ênfase em Nematologia de plantas pela Universidade Federal de Santa Maria, campus Frederico Westphalen (RS), e Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Santa Maria, campus Sede (RS) em parceria com a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (DF), com ênfase em Nematologia de plantas. Atualmente ocupa o cargo de Nematologista, Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento na empresa JCO Bioprodutos, atuando como responsável, Coordenadora e Supervisora das pesquisas do campo na área de Nematologia. Possui experiência em diagnose, amostragens para análises nematológicas, planejamento, instalação, condução e avaliação de experimentos visando manejo de fitonematoides. Também ministra treinamentos visando o preparo da equipe técnica e dos parceiros, bem como palestras em eventos. E-mail: marciagabriel@jcobiodprodutos.com.br

MARIE LUISE CAROLINA BARTZ. Possui graduação em Ciências Biológicas (2003) e mestrado em Agronomia (2007), pela Universidade Estadual de Maringá, e doutorado em Agronomia (2011), pela Universidade Estadual de Londrina, com ênfase na área de solos. Atualmente é colaboradora no Centro Municipal de Cultura de Desenvolvimento de Idanha-a-Nova em Portugal, onde é gestora da Bio-Região de Idanha-a-Nova e membro da Comissão de Co-Gestão do Parque Natural do Tejo Internacional, além de pesquisadora e articuladora na parceria Organic Farming - Parceria para Agricultura e Produção Biológica, via Centro de Agricultura Regenerativa e Biológica e no Centro de Ecologia Funcional da Universidade de Coimbra em Portugal, é professora visitante na Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá e diretora secretária da Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto no Brasil. Possui experiência em biologia do solo, sistemas de uso do solo e manejo do solo no Brasil, Moçambique e Portugal, com ênfase em macrofauna do solo e o Sistema Plantio Direto (Agricultura Conservacionista), atuando principalmente nos temas: ecologia, biologia e taxonomia de minhocas em agroecossistemas e áreas nativas, integrando os temas ecologia e taxonomia, cuidado e conservação do solo, assim como o público acadêmico/científico e os agricultores. Desenvolve a linha de investigação no âmbito de projetos como o Sistema Plantio Direto: base para uma agricultura sustentável - SPD Agro+ (EuroClima 600 k euros) e coordenou e colaborou em mais de 55 projetos. Orientou e coorientou mais de 25 alunos de graduação, mestrado e doutorado. É autora e coautora de mais de 50 artigos, além de capítulos de livros e foi idealizadora e coordenadora da biografia do pioneiro do Plantio Direto na América Latina, Herbert Bartz, e os livros infantis inspirados na história deste lendário agricultor. Atualmente é editora responsável pelo grupo Oligochaeta na América Latina na revista Zootaxa e editora associada na Revista Brasileira de Ciências Ambientais. E-mail: bartzmarie@gmail.com

RAFAELA TAVARES DUDAS. Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Positivo (Curitiba/Paraná), onde também concluiu seu mestrado em Gestão Ambiental. Atualmente, está cursando o doutorado em Ciência do Solo na Universidade Federal do Paraná, com foco na biologia do solo, especialmente na macrofauna, com ênfase em oligoquetas. Sua pesquisa se concentra na descrição de novas espécies de minhocas e sua relação com diferentes práticas de manejo do solo. A pesquisadora tem realizado análises moleculares para compreender a evolução e distribuição desses organismos. Ao longo do tempo, tem participado ativamente de projetos ambientais, contribuindo com a análise de dados, técnicas de laboratório e redação científica. E-mail: rafaela.dudas@outlook.com

RODRIGO ROANI. Engenheiro agrônomo, graduado pela Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC - Campus de Xanxerê/Santa Catarina), onde surgiu a oportunidade de contato com a biota do solo. Mestre em Ciência do Solo na Universidade Federal do Paraná (UFPR), com ênfase na macrofauna do solo em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) no cerrado. Atualmente, está cursando doutorado em ciência do solo na UFPR, com foco em ecotoxicologia terrestre, utilizando oligoquetas. Sua pesquisa se concentra em observar a letalidade e reprodução de três espécies de minhocas em diferentes sistemas de uso do solo. E-mail: rodrigoani@hotmail.com

RENATA CRISTINA DA SILVA COSTA. Possui graduação em Ciências Biológicas pela UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz (2001) e Mestrado em Zoologia Aplicada à Conservação pela UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz (2006). Conselheira do Conselho Regional de Biologia, 8ª Região - CRBio 08, Gestão 2014/2018 e Gestão 2019/2023. Lecionou na UNEB - Universidade Estadual da Bahia, nos cursos de Ciências Biológicas e Ciências Agrárias, no curso de Pós-graduação (Mestrado) em Gestão Ambiental da Faculdade João Calvino, trabalhando com a disciplina Concepção, Teoria e Desenvolvimento Ambiental. Tem experiência na área de Zoologia, com ênfase em Ecologia, atuando principalmente nos seguintes temas: etnoecologia, conservação, fauna, etnoconservação. Realiza consultoria na área de fauna, com Levantamentos Ecológicos, e Planos de Resgate e Fuga da Fauna Silvestre e Listas Faunísticas, Manejo de fauna, Legislação Ambiental, Licenciamento Ambiental, Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), Educação Ambiental e Acompanhamento e Monitoramento da Fauna durante a Supressão de Vegetação. E-mail: renatadamaso@hotmail.com

SARA DANTAS ROSA. Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da área de Solos da JCO bioprodutos (Atual). Coordenadora de Pesquisa e desenvolvimento da área de solos na JCO bioprodutos (2021-2023). Professora voluntária na Universidade de Brasília - FAV/UnB (2020-2021). Professora substituta na Universidade de Brasília (FAV/UnB) de 2019-2020. Possui Doutorado (2019) e Mestrado (2015) em Ciência do Solo (Fertilidade e Nutrição de Plantas) pela Universidade Federal de Lavras e graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade de Brasília (2012). Cursou um semestre de Agronomia na Universidad Nacional del Sur - Argentina através do programa de intercâmbio MARCA 2º semestre 2011. De 2017-2019 foi membro do Núcleo de Estudos em Ciência do Solo (NECS), da Universidade Federal de Lavras. Tem experiência na área de Ciências Agrárias na parte de Pesquisa e Desenvolvimento de Mercado, com ênfase em Ciência do Solo e nas culturas de Soja, Milho e Algodão. E-mail: sararosa@jcobiprotutos.com.br

SAULO AIRES DE SOUZA. Possui Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela USP e Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília. Foi empregado do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) entre 2006 e 2010 exercendo o cargo de pesquisador, atuando no desenvolvimento de modelos e previsão hidrológica para o planejamento da operação e expansão de sistemas hidroelétricos. Atualmente é coordenador de Mudanças Climáticas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) atuando na área de análise de impacto da mudança climática, estudos hidrológicos, sistemas hídricos e no planejamento de recursos hídricos. E-mail: saulo.souza@ana.gov.br

VALDELICE OLIVEIRA LACERDA. Bacharela em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), com período de graduação sanduíche na Faculdade de Ciências Universidade de Lisboa em Lisboa - Portugal, através do programa de intercâmbio Ciências sem Fronteiras. Mestre Ciências Ambientais, Mestrado em Ciências Ambientais e Doutora em Fisiologia Vegetal pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Tem experiência na área de Botânica, com ênfase em Fisiologia Vegetal. E-mail: vallacerda.vl@gmail.com

VALMIR DÂMASO DE ALMEIDA JÚNIOR. Possui Graduação em Ciências Biológicas pela UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz (2001) e Mestrado em Ambiente e Sustentabilidade pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS (2022). Foi docente do Curso de Ciências Biológicas da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) Campus IX, Barreiras, Bahia. Tem experiência na área Zoologia, com ênfase em Ecologia, atuando principalmente nos seguintes temas: avaliação de fauna e flora, zoologia de vertebrados, Cerrado, levantamentos ecológicos e ecologia. Realiza consultoria na área de fauna, com Levantamentos Ecológicos, e Planos de Resgate e Fuga da Fauna Silvestre e Listas Faunísticas, Manejo de fauna, Legislação Ambiental, Licenciamento Ambiental, Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), Educação Ambiental e Acompanhamento e Monitoramento da Fauna durante a Supressão de Vegetação. E-mail: damasojunior@hotmail.com

WILIAN CARLO DEMETRIO. Técnico em Agropecuária pelo Centro de Educação Profissional Vidal Ramos, graduação em Agronomia - Unidade de Ensino Superior Vale do Iguaçu (2013) e Mestrado (2015) e Doutorado (2019) em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Paraná. No mestrado realizou pesquisa focada em biologia e ecologia do solo com aplicação agrícola. No doutorado desenvolveu estudos relacionados com ecologia de invertebrados, fertilidade do solo e matéria orgânica em áreas de Terra Preta de Índio (Amazonian Dark Earths) na Amazônia, tendo recebido prêmio de Excelência Acadêmica junto à UFPR pela tese desenvolvida. Realizou pós-doutorado na UFPR (2019-2020) sobre minhocas como indicadoras da qualidade do solo em áreas de plantio direto, e no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2020-2022) com foco em ecologia e o uso da fauna do solo como indicadora de serviços ecossistêmicos. Atualmente é Pós-doutorando na ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP) vinculado ao projeto FaunaServices (<https://www.fondationbiodiversite.fr/en/the-frb-in-action/programs-and-projects/le-cesab/faunaservices/>) que tem por objetivo compreender a relação entre a biodiversidade da macrofauna do solo e a prestação de serviços ecossistêmicos nas florestas neotropicais da América do Sul. As áreas de conhecimento e interesse são biologia e ecologia do solo (a biota edáfica como indicadores da qualidade física, química e biológica do solo) manejo, conservação e fertilidade do solo. E-mail: wiliandemetrio@hotmail.com

SOBRE O CONSELHO EDITORIAL

ADRIANA MIGLIORINI KIECKHÖFER. Doutorado em Engenharia de Produção (Gestão Ambiental) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestrado em Ciências Gerenciais (Gestão de Negócios) pela Universidade de Marília. Graduação em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Educação Artística pela Universidade do Estado de Santa Catarina. Atuou como professora e pesquisadora na Universidade de Marília (UNIMAR-SP) por doze anos e na Universidade Federal da Bahia (UFBA) por dois anos. Atualmente é Professora Associada III da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), onde foi Pró-Reitora de Administração e Infraestrutura e Superintendente Administrativa do Campus Reitor Edgard Santos. Autora do livro "Promoção dos Desenvolvimento Integrado e Sustentável de Municípios". Tem experiência na área de Economia e Gestão Ambiental, com ênfase em Teoria Geral da Economia, Desenvolvimento Econômico e Desenvolvimento Sustentável, atuando principalmente nos seguintes temas: crescimento e desenvolvimento econômico, meio ambiente e desenvolvimento sustentável. E-mail: adriana.mk@ufob.edu.br

ALESSANDRA TEREZINHA CHAVES COTRIM REIS. Possui Graduação em Ciências Biológicas, Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Mestrado e Doutorado em Botânica, Pós-doutorado com enfoque na Implementação do Código Florestal Brasileiro Lei nº 12.651/2012 em áreas de Cerrado na Bahia, Brasil. Trabalhou no Centro de Recursos Ambientais (CRA), foi docente dos cursos de Engenharia Agrônoma e Ciências Biológicas da Universidade do Estado da Bahia (UNEB) e Diretora de Meio Ambiente da Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA). Realizou diferentes trabalhos envolvendo florística e fitossociologia em áreas de Cerrado e em áreas de Florestas Estacionais, além de condução de programas voltados a propagação de espécies nativas do Cerrado, restauração de áreas, implementação de Plano de manejo de Unidade de Conservação e regularização ambiental de empreendimentos rurais. Atualmente é Sócia-fundadora da Sustentabili: Planejamento, Projetos e Ações e Assessora de Sustentabilidade na JCO Bioprodutos. Tem mais de 25 anos de experiência na condução de trabalhos na área de Legislação Ambiental, Agronegócio, Compliance, Recursos Hídricos, Vegetação e Florística do Cerrado, Restauração de áreas e elaboração e condução de Programas de Sustentabilidade e Certificações. E-mail: chavescotrim@gmail.com

ANA MARIA MAPELI. Possui Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2002), Mestrado em Ciências Agrárias (Fisiologia Vegetal) pela Universidade Federal de Viçosa (2005) e Doutorado em Ciências Agrárias (Fisiologia Vegetal) pela Universidade Federal de Viçosa (2009). Atualmente é docente da Universidade Federal do Oeste da Bahia. Tem experiência na área de Botânica, com ênfase em Fisiologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: alelopatia, germinação, conservação pós-colheita, crescimento, sementes e longevidade floral. E-mail: mmapeli@ufob.edu.br

JORGE DA SILVA JÚNIOR. Possui Graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de Lavras - UFLA (2003), é Doutor em Produção Vegetal em Áreas do Cerrado (Fitotecnia) pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU (2019) e Mestre em Fitotecnia pela Universidade Federal de Lavras - UFLA (2006). Atualmente é Supervisor Regional de Vendas Sênior na TIMAC Agro, Consultor administrativo da Agro+ Consultoria e Pesquisas Agrônomicas, e atua na área de pesquisa e docência, e como Professor Pesquisador da UNEB - Campus IX em Barreiras, no Curso de Agronomia. Tem experiência com o Manejo de Carbono e Boas Práticas Agrícolas, Controle de Doenças de Plantas Cultivadas, manejo natural de pragas com extratos vegetais, e outras áreas da Agronomia, com ênfase em Fisiologia

de Plantas Cultivadas, Uso e Manejo de Solos, Fertilidade e Nutrição de Plantas, atua principalmente nos temas: Pesquisa Agrícola, docência do ensino superior, e prestação de serviços na área Agrônômica. E-mail: jorsilva@uneb.br

MARITÂNIA SALETE SALVI RAFAGNIN. Doutora em Política Social e Direitos Humanos e Mestre em Política Social pela Universidade Católica de Pelotas (UCPel). Especialista em Administração Estratégica em Recursos Humanos; em Direitos Humanos; e, em Contabilidade e Finanças. Graduada nos cursos de Ciências Contábeis, Serviço Social e Gestão Pública. Editora Técnica da Revista Sociedade em Debate (Qualis A2) vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Política Social e Direitos Humanos da UCPel. Docente Adjunta A do Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães da Universidade Federal do Oeste da Bahia, atuando nos cursos de Engenharia de Produção e Engenharia de Biotecnologia. E-mail: maritania.rafagnin@ufob.edu.br

MARCO ANTONIO TAMAI. Possui Graduação em Agronomia pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP) (1991), mestrado (1998) e doutorado (2002) em Entomologia pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), além de pós-graduação Lato Sensu em Proteção de Plantas (Universidade Federal de Viçosa). Atualmente é Professor Adjunto B e Pesquisador da Universidade do Estado da Bahia (UNEB, Campus IX, Barreiras/BA). É professor nos cursos de Pós-Graduação *lato sensu* de Especialização em Produção Vegetal no Cerrado da Universidade do Estado da Bahia (Campus IX) e, Especialização em Produção Vegetal do Centro Universitário Arnaldo Horácio Ferreira (UNIFAAHF, Luís Eduardo Magalhães/BA). Deste 2014 é membro do Programa Fitossanitário da Bahia onde conduz projetos de pesquisas com fundações e empresas públicas e privadas nacionais e internacionais no desenvolvimento de inseticidas químicos e botânicos, produtos biológicos (fungos, vírus, bactéria e parasitóides) e semioquímicos sintéticos aplicados ao manejo de pragas e fitopatógenos na agricultura, além de conduzir projetos de extensão nas áreas de treinamento de técnicos agrícolas e engenheiros agrônomos em identificação e manejo de insetos e ácaros-praga das culturas da soja, algodão, milho, sorgo e feijão. Desde 2012 é membro titular do Comitê Estadual do Programa Nacional de Controle de Ferrugem Asiática da Soja. E-mail: mtamai@uneb.br

Dedico esta publicação a todas as pessoas que nunca desistiram, e continuam determinadas em fazer o presente e o futuro cada vez mais sustentável, em todos os aspectos.

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis

O Cerrado é um ambiente ÚNICO, e neste espaço conseguimos identificar rica diversidade, uma agricultura pujante e muitas oportunidades. Desta maneira, é imprescindível a adoção de práticas agrícolas cada vez mais sustentáveis, que consigam atender a uma demanda crescente por alimento, mas também possa conciliar a conservação dos serviços ambientais e ecossistêmicos essenciais para as gerações atuais e futuras.

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis

APRESENTAÇÃO

Os altos índices de produtividade em diferentes regiões do Brasil têm demonstrado que o produtor rural vem utilizando muita tecnologia e inovação no campo. Entre os avanços importantes conduzidos em áreas rurais, a incorporação cada vez mais frequente de insumos biológicos nos sistemas produtivos associados a adoção de boas práticas de manejo e conservação dos solos e da água, tem trazido um novo olhar para a agricultura tropical, fato que tem demonstrado a responsabilidade do produtor rural na condução de ações cada vez mais sustentáveis.

Assim, a busca incansável para ampliar a sustentabilidade conduzida em campo sempre foi uma meta pessoal e profissional, e neste contexto surgiu a JCO Bioprodutos que em quase 30 anos de atuação, tem buscado transformar as áreas rurais com muita pesquisa, inovação, tecnologia e segurança, contribuindo para ampliar a sustentabilidade ambiental, social e econômica em diferentes regiões do Brasil, especialmente no Cerrado.

A JCO faz parte da história de uma luta humana por ideais, valores e esperança pelos quais homens e mulheres estão dispostos a se entregar, tendo como premissa valores que muitas vezes são imperceptíveis para alguns, e muito promissores para outros, que de maneira sistemática os estudam, e dedicam suas carreiras para torná-los realidade. Deste modo, ao longo do tempo, com muita pesquisa e determinação temos feito a diferença no campo, buscando na natureza microrganismos para fomentar uma produção cada vez mais sustentável atendendo a uma demanda crescente por alimentos mais sustentáveis, uma vez que a pesquisa e inquietação perante os desafios da agricultura moderna fazem parte do DNA da Empresa.

Novos projetos visando criação de soluções inovadoras, a qualidade dos produtos e a satisfação do consumidor, são constantemente discutidos e testados na JCO. Essa é a força da Empresa, contando com um passado de tradição, um presente de qualidade e um futuro de trabalho e inovação. Sua atuação em uma área aproximada de 4 milhões de hectares atualmente, demonstra que ao longo do tempo a condução de pesquisas sistemáticas e inovação tem uma agricultura mais sustentável, onde a saúde do solo e a utilização de microrganismos para controle biológico e promotores de crescimento das plantas tem trazido benefícios diretos ambientais e econômicos por meio do enriquecimento da microbiota do solo.

O diferencial da JCO reside em sua equipe técnica multidisciplinar com expertise em diversas áreas que permite desenvolver produtos de alta qualidade e oferecer atendimento diferenciado de assistência técnica que atende a especificidades regional e a expectativa dos produtores rurais. De maneira paralela, a criação do Instituto JCO vem como um importante braço de atuação da Empresa na disseminação de conhecimento e na área ambiental e social.

Pensando nisto, apoiamos a publicação desta obra, pois acreditamos que a abordagem integrada, envolvendo diferentes interlocutores e parceiros traz um enfoque sistêmico que é essencial quando estamos falando da agricultura no Cerrado.

José Claudio de Oliveira
Presidente do Instituto JCO

INSTITUTO JCO

O Instituto JCO tem como missão diminuir as desigualdades sociais por meio da educação de crianças, jovens e adultos, objetivando melhorarias no nível de emprego, renda e na qualidade de vida. Também incentiva práticas voltadas para a agricultura regenerativa por meio da utilização de produtos biológicos, a condução do Manejo Integrado de Pragas (MIP) e a adoção de boas práticas de manejo e conservação do solo e da água.

Com projetos e ações, o Instituto visa fortalecer as gerações presentes e futuras, educando a sociedade para a prática do desenvolvimento sustentável, no sentido de conciliar o desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Para tanto, um dos caminhos é conservar os recursos naturais e a biodiversidade, mitigando as mudanças climáticas por meio da utilização de bioprodutos e apoiando a agricultura regenerativa para aumentar os estoques de carbono no solo e a conservar os recursos naturais.

O compromisso da JCO Bioprodutos é conciliar o desenvolvimento econômico com uma produção sustentável, desenvolvendo pesquisas em biotecnologia para extrair microrganismos da natureza e transformá-los em bioativos. Sendo bem-sucedido, o compromisso do Instituto JCO, por sua vez, irá gerar impactos diretos no desenvolvimento social e no cumprimento da agenda preconizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) que contempla em seus objetivos a erradicação da pobreza, fome zero e agricultura sustentável, educação de qualidade, trabalho decente e crescimento econômico, redução das desigualdades, cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis, ação contra a mudança global do clima e vida terrestre.

Assim, incentivar a publicação deste livro é um caminho para demonstrar a responsabilidade que a JCO tem com o desenvolvimento sustentável por meio do fomento à pesquisa, à inovação e a preservação do Cerrado, bem como a difusão do conhecimento e a produção sustentável de alimentos realizada pelo agronegócio. Este é também um papel fundamental no fortalecimento dos princípios do ESG (*Environment, Social e Governance*), que aumentam a transparência, melhoram a eficiência operacional, reduzem o impacto ambiental e promovem a inclusão social.

Portanto, este livro é um convite para embarcar em uma jornada de transformação e conhecimento, onde cada página reafirma o compromisso do Instituto JCO com um futuro mais justo, sustentável e próspero para todos.

Helmuth Kieckhöfer
Diretor do Instituto JCO

PREFÁCIO

Este livro busca contribuir com diferentes informações e temas atuais sobre o Cerrado, trazendo a abordagem teórica e a experiência prática de 37 diferentes pesquisadores, em 15 capítulos, sobre diversos temas, aspectos e olhares, visando colaborar com a ampliação do conhecimento do leitor.

O Cerrado é diverso por diferentes aspectos. Procuramos abordar nos capítulos que seguem as perspectivas relacionadas a história, ocupação, conservação, biodiversidade, fenologia de plantas nativas, manejo e conservação dos solos, formação geológica, recursos hídricos e legislação. Esses temas são essenciais para entender melhor o Cerrado e todos os aspectos que estão inter-relacionados com o processo de ocupação e conservação atual.

A sustentabilidade na condução dos diferentes processos produtivos tem sido uma busca constante em áreas rurais no Brasil, a inovação aliada as novas tecnologias, gestão, eficiência e a inteligência territorial têm sido essenciais na construção de modelos produtivos diferenciados, os quais são imprescindíveis para manutenção dos serviços ambientais e ecossistêmicos. Desta maneira, o incentivo ao cumprimento da legislação, a adoção de boas práticas de uso, manejo e conservação do solo e da água, preservação da vegetação nativa, manutenção da biodiversidade, utilização de biológicos, condução de atividades agrossilvipastoris com baixa emissão de carbono, tendem a ser importantes ferramentas de transformação no campo, trazendo segurança para manutenção de produtividade em áreas antropizadas, reduzindo a pressão sobre a abertura de novas áreas, considerando que há dependência direta do manejo destinado a produção, com a manutenção dos recursos naturais e dos processos físicos e biológicos.

Procuramos envolver nesta edição, diferentes profissionais, os quais gentilmente aceitaram o convite para contribuir com esta publicação. Contribuíram conosco pesquisadores, docentes, gestores, analistas e profissionais liberais que ao longo do tempo tem colaborado com o seu conhecimento para ampliar a sustentabilidade no Cerrado associada a gestão e inteligência no campo, otimização do uso e manejo do solo e da água, valorização de ativos ambientais, incentivos a restauração e/ou recuperação de áreas degradadas.

Agradeço ao José Claudio de Oliveira que é o Presidente do Instituto JCO e da JCO Bioprodutos, e a todos que participaram e colaboraram de maneira direta ou indireta para o desenvolvimento desta publicação, incluindo também as diferentes instituições que disponibilizam informações essenciais para tomada de decisões e disseminação do conhecimento, transcritos nesta edição.

Com certeza a consolidação desta edição não seria possível sem o incentivo, a dedicação, o empenho e principalmente o conhecimento de todos os envolvidos!

Espero que esta publicação seja uma grande oportunidade de conhecer um pouco mais o Cerrado e todos os aspectos envolvidos.

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis
Bióloga/Doutora em Botânica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

CERRADO A SAVANA BRASILEIRA: ORIGEM, DISTRIBUIÇÃO, ADAPTAÇÃO E OPORTUNIDADES

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim REIS.....01

CAPÍTULO 2

DIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA FLORA DO CERRADO BRASILEIRO

Jessica Cauana de Oliveira SANTANA.....21

CAPÍTULO 3

FENOLOGIA DE PLANTAS NATIVAS DO CERRADO E ESTRATÉGIAS DE RESTAURAÇÃO

Ana Maria MAPELI

Valdelice Oliveira LACERDA.....41

CAPÍTULO 4

BIODIVERSIDADE DA FAUNA DE VERTEBRADOS NO DOMÍNIO CERRADO

Valmir Damaso de ALMEIDA JÚNIOR

Renata Cristina da Silva COSTA.....57

CAPÍTULO 5

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA NO CERRADO

Aziz Galvão da SILVA JUNIOR.....103

CAPÍTULO 6

USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, IMPACTOS E IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Jorge da SILVA JÚNIOR

Francisco Assis de OLIVEIRA.....119

CAPÍTULO 7

SOLOS DO BIOMA CERRADO: MANEJO, CONSERVAÇÃO E POTENCIAL PARA O MERCADO DE CARBONO

Camila Almeida dos SANTOS

Eduardo Carvalho da SILVA NETO.....133

CAPÍTULO 8**DIVERSIDADE DE MICRORGANISMOS E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA PARA A SUSTENTABILIDADE DA AGRICULTURA NO CERRADO BRASILEIRO**

Andrea Carla Caldas BEZERRA

Flávia Virgínia Ferreira de ARRUDA

Inácio Pascoal do MONTE JÚNIOR

Leonardo de Oliveira BARBOSA

Sara Dantas ROSA.....149

CAPÍTULO 9**MACROFAUNA DO SOLO E MINHOCAS EM SISTEMAS DE USO DO SOLO NO CERRADO**

Marie Luise Carolina BARTZ

Wilian Carlo DEMETRIO

Rafaela Tavares DUDAS

Rodrigo ROANI

George Gardner BROWN165

CAPÍTULO 10**NEMATOIDES NAS CULTURAS DO CERRADO E PERSPECTIVAS DO CONTROLE BIOLÓGICO NO MANEJO INTEGRADO**

Jessica da Mata dos Santos MONTEIRO

Márcia GABRIEL

João Marcos Pereira NOVAIS

José Olímpio Lopes VIEIRA JÚNIOR.....195

CAPÍTULO 11**INTER-RELAÇÃO ENTRE USO/MANEJO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO DOS CERRADOS DO BRASIL**

Joaquim Pedro SOARES NETO

Heliab Bomfim NUNES

Jamile da Silva OLIVEIRA.....223

CAPÍTULO 12**CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO CERRADO BRASILEIRO:
ASPECTOS HISTÓRICOS E EVOLUÇÃO DO PAPEL SOCIOECONÔMICO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Gerson Cardoso da SILVA JUNIOR

Eduardo Antônio Gomes MARQUES

Fernanda Caetano de Mattos Bastos CUNHA.....243

CAPÍTULO 13**GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA SEGURANÇA HÍDRICA DE ÁREAS
IRRIGADAS NO CERRADO**

Lineu Neiva RODRIGUES

Saulo Aires de SOUZA

Edson Eyji SANO

Antônio Heriberto de Castro TEIXEIRA.....275

CAPÍTULO 14**AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO: EFICIÊNCIA, MANEJO E INOVAÇÃO
PARA SUSTENTABILIDADE**

Everardo MANTOVANI

Gregorio Guirado FACCIOLI.....295

CAPÍTULO 15**ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS NO CERRADO E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL**

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim REIS.....317

CAPÍTULO 1

CERRADO A SAVANA BRASILEIRA: ORIGEM, DISTRIBUIÇÃO, ADAPTAÇÃO E OPORTUNIDADES

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis

Resumo

A ocorrência das Savanas está associada principalmente as zonas tropicais, e representam uma parcela significativa da cobertura vegetal e da diversidade global, sendo responsáveis por cerca de 30% da produção primária de toda vegetação terrestre. No Brasil estas fisionomias se encontram principalmente no Planalto Central, as quais estão associadas ao Cerrado. No Nordeste, pode ser encontrada especialmente no Oeste da Bahia, sendo uma continuação do Cerrado de Goiás, Tocantins e sul do Piauí. Tais áreas, apresentam características em comum com a região Centro Oeste, seja pelas fisionomias, ou pela presença de espécies típicas ou de ampla distribuição. Contribuições importantes sobre a vegetação e florística do Cerrado, incluindo a sua distribuição e ocorrência em diferentes regiões do Brasil, vem sendo relatadas por diferentes autores ao longo dos anos; e os estudos têm demonstrado que estas fisionomias exercem um papel fundamental para manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais, uma vez que a sua formação e origem estão associados a diversos processos, os quais tem moldado as suas características em diferentes regiões do mundo. O Cerrado está entre as 36 áreas consideradas críticas para conservação da diversidade biológica no mundo (*hotspots*) devido à sua riqueza e à alta pressão antrópica. Desta maneira, informações sobre a origem e características da vegetação e sua biodiversidade são fundamentais para identificação de oportunidades, inclusive associadas a valorização dos ativos ambientais e das medidas de restauração, conforme estabelecido na legislação brasileira, através de mecanismos importantes trazidos pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), que lastreia a legislação dos Estados no que se refere a gestão de vegetação nativa, e na Lei Complementar nº 140/2011, que fixou normas para a cooperação entre os entes da federação relativas ao meio ambiente. Ambas são fundamentais para manutenção da biodiversidade, recursos hídricos, regulação do clima e estabilidade dos solos.

1.1 Introdução

A ocorrência das Savanas está associada principalmente às zonas tropicais, e recobrem um quinto da superfície do planeta (Sankaran *et al.* 2005). Conforme Olson *et al.* (2001) as Savanas representam uma significativa parcela da cobertura vegetal e da diversidade global, e de acordo com Grace *et al.* (2006) são responsáveis por 30% da produção primária de toda vegetação terrestre.

Historicamente, a evolução do conceito das Savanas está associada aos critérios utilizados na definição e/ou na classificação nos diferentes continentes. Assim, a maioria das definições sobre Savana disponíveis na literatura inclui aspectos fisionômicos, climáticos (estacionais),

latitudinais, geográficos, florísticos e ecológicos (e.g. competição e fogo), além de sugerir o importante papel do tempo geológico (Aquino *et al.*, 2012), dificultando por muitas vezes a definição do conceito, considerando que existem variações no peso dos critérios utilizados nos sistemas de classificação, culminando, conseqüentemente nas diferenças terminológicas, sua aplicação, incluído o grau de influência humana sobre essa paisagem.

O termo “Savana”, em português, tem origem Ameríndia e tem recebido numerosas definições, as quais são aplicadas em todos os continentes, com abordagens que enfocam diferentes critérios, culminando ao longo do tempo em conflitos quanto a sua definição, delimitação e formas de classificação (e.g. Baurliere; Hadley, 1983; Cole, 1986; Collinson, 1988; Brasil, 1992; Rizzini, 1997; Ribeiro; Walter, 1998; Mistry, 2000; Marchiori, 2004; Walter, 2006; Oliveira-Filho, 2009; Batalha, 2011; Reis, 2014).

Entre as contribuições importantes para o entendimento sobre as Savanas mundiais ressalta-se o francês François Bourlière, que em conjunto com autoridades que trabalhavam com o tema, publicaram em 1983, o livro intitulado: *Ecosystems of the world 13: tropical savannas*, mostrando as características das Savanas nos continentes (Walter 2006). Com esta publicação, os autores demonstraram que as condições climáticas, edáficas, hidrológicas e geomorfológicas, além da presença do fogo, pastejo e ação antrópica, são determinantes para a formação das Savanas.

Assim, ao longo dos anos, as Savanas, tem sido amplamente discutida por diferentes pesquisadores e especialistas (e.g. Cole, 1986; Eiten 1994; Salgado-Labouriau *et al.* 1998; Walter *et al.*, 2008; Pinheiro e Monteiro 2010; Pinheiro, 2010; Reis, 2014), trazendo contribuições importantes no que diz respeito a evolução do conceito e sua aplicação, a distribuição, a diversidade e a sua biodiversidade associada. Estes fatores em conjunto, orientam estratégias essenciais para conservação, preservação, restauração e implementação de políticas públicas que norteiam o uso e ocupação do solo nos diferentes continentes.

Estudos conduzidos por Walter (2006), demonstram que o pesquisador (botânico e fitogeógrafo) alemão August Heinrich Rudolph Grisebach, em 1872, parece ter sido o primeiro a usar o termo Savana com significado mais difundido até o presente, o qual é “*utilizado para designar paisagens com poucas árvores espalhadas em um ambiente graminóide em outros lugares do mundo e não apenas em paisagens da América do Sul*”; e complementa que posteriormente, o ecólogo alemão Oscar Drude e o fitogeógrafo francês Andreas Franz Wilhelm Schimper estenderam o conceito de Savana para a vegetação com ocorrência esparsa de arbustos e árvores sendo estes seguidos por diferentes tentativas de definir com exatidão o termo. Entretanto, como o termo passou a ser aplicado nos diferentes continentes, distintas definições foram incorporadas ao longo do tempo levando em conta principalmente a importância dos diferentes processos e formação da cobertura lenhosa e as particularidades de cada região, condições que por muitas vezes acabam trazendo dificuldade no entendimento e aplicação do termo em diferentes regiões do mundo.

Para as duas escolas tradicionais em estudos ecológicos (Escola Européia e Escola Americana) (Collinson, 1988), a principal diferença com referência aos conceitos está relacionada a sua distribuição geográfica. Para os seguidores da corrente Européia as Savanas ocorrem na zona tropical, localizada entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio (22,5° norte e sul da linha do Equador), definindo a “*Savana como uma formação tropical com domínio de gramíneas, contendo proporção maior ou menor de vegetação lenhosa aberta e árvores*

associadas”, entre os autores desta Escola, tem-se e.g. Cole (1986). Por outro lado, para a corrente Americana, as Savanas ocorrem além da zona tropical, estendendo-se para a zona subtropical (entre 23° e 35° ao sul do Trópico de Capricórnio e 23° e 35° ao norte do Trópico de Câncer), apresentando a mesma definição fisionômica, mas expandindo o conceito *para além das formações tropicais*, e conforme Solbrig (1991) *apud* Mistry (2000), “*as Savanas são um tipo de vegetação mais comuns nos trópicos e subtropicais*”. Apesar de divergências quanto a aplicação das definições terminológicas Mistry (2000) ressalta que as Savanas ocupam uma área de 15 milhões de km² ou ca. 33% da superfície continental, podendo ocorrer em diferentes continentes, cuja variações podem estar relacionadas às condições edáficas, à temperatura, à altitude e à pluviosidade.

Diversas teorias têm sido propostas para explicar a formação das Savanas no mundo (e.g. Cole, 1960; Salgado-Labouriau *et al.*, 1998, Oliveira Filho; Ratter 2002; Bayon *et al.*, 2012), incluindo as possibilidades de origem natural ou antrópica (Ledru 2002); e entre as teorias mais discutidas para apoiar a origem desta vegetação relaciona-se a influência do clima (Eiten, 1994), solo (Alvim, 1954), fogo (e.g. Coutinho 1990), natural (Fernandes, 2000; Ledru, 2002) e antrópica (Bayon *et al.*, 2012). Teorias que ao longo do tempo corroboram a importância e a combinação de diferentes fatores para condicionarem a distribuição das fisionomias em diferentes regiões no mundo, norteando também a sua definição.

Considerando as visões de diferentes autores, as Savanas são definidas como ecossistemas compostos por estrato herbáceo, muitas vezes contínuo ou compartilhado com estratos arbustivos e arbóreos, que variam na intensidade de cobertura (Furley; Newey, 1983; Solbrig, 1996). Bourlière; Hadley (1983) classificam as Savanas como vegetações tropicais formadas por estrato herbáceo quase contínuo, interrompido apenas por arbustos e árvores em densidades variáveis e, em que, os principais padrões de crescimento estão associados às estações úmidas e secas alternantes. A classificação adotada pelo IBGE (2012) descreve que a Savana (Cerrado) é subdividida em quatro subgrupos de formação: Savana Florestada; Savana Arborizada; Savana Parque; e Savana Gramíneo-Lenhosa utilizando o conceito como ..."*vegetação xeromorfa, que ocorre sob distintos tipos de clima, revestindo solos lixiviados aluminizados, apresentando sinúsias de hemicriptófitos, geófitos, caméfitos e fanerófitos oligotróficos de pequeno porte...*".

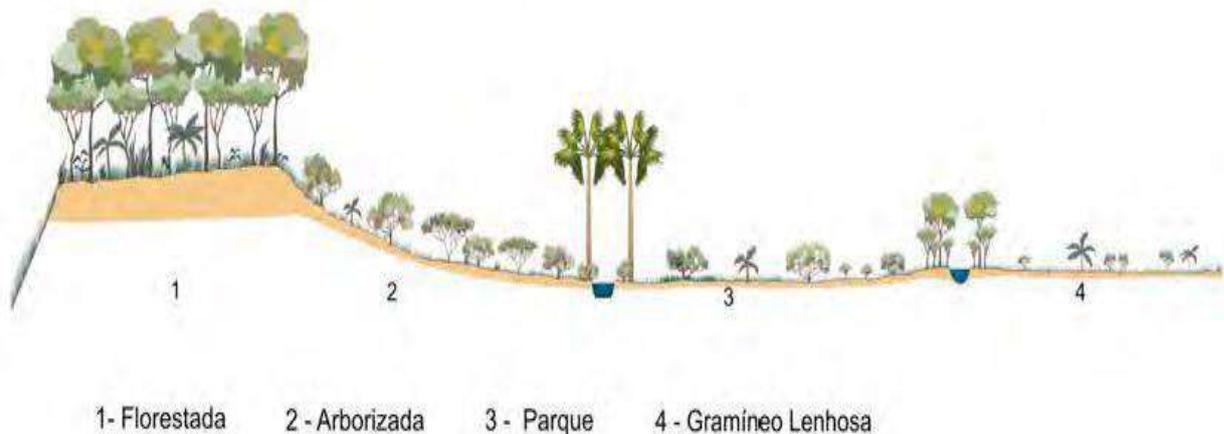
Analisando a amplitude de discussões sobre o tema, para responder se “Cerrado” é Savana, de acordo com Walter (2006), o primeiro aspecto a se considerar é conceitual. Cerrado é uma palavra que possui três acepções técnicas (Ribeiro; Walter, 1998): a primeira e mais abrangente acepção, “*refere-se ao bioma predominante no Brasil Central*”; a segunda acepção, *Cerrado sentido amplo (lato sensu), reúne as formações savânicas e campestres do bioma, incluindo desde o cerradão até o campo limpo* (Eiten, 1994). Portanto, sob este conceito há uma única formação florestal incluída, o cerradão. O Cerrado sentido amplo é um tipo de vegetação definido pela composição florística e pela fisionomia (formas de crescimento), sem que o critério estrutura seja considerado; e a terceira acepção do termo, *cerrado sentido restrito (stricto sensu), que designa um dos tipos fitofisionômicos que ocorrem na formação savânica, definido pela composição florística e pela fisionomia, considerando tanto a estrutura quanto as formas de crescimento dominantes*. Desta maneira, considerando as três acepções indicadas, pode-se considerar que o bioma Cerrado é caracterizado principalmente por uma típica Savana, em seu sentido fisionômico mais difundido conforme Collinson (1988) e distribuído, uma *formação tropical com domínio de gramíneas, contendo uma proporção maior ou menor de*

vegetação lenhosa aberta e árvores associadas, evidenciada nas fisionomias de cerrado sentido restrito, as quais caracterizam bem o bioma.

Seguindo nesta perspectiva, muitos autores de acordo com Walter *et al.* (2008) considera as principais formas de vegetação do Cerrado (ou parte do bioma, da província, ou do domínio) subordinada ao conceito de Savana, como Felfili e Silva Júnior (1993), que anotaram: “A vegetação de Cerrado é considerado uma Savana sazonal úmida” (*The cerrado vegetation is considered a wetseasonal savanna*); ou Ratter *et al.* (1997), que escreveram que “A Savana brasileira é chamada cerrado” (*The Brazilian savanna vegetation is called cerrado*); ou, ainda, de acordo com Oliveira e Marquis (2002), descrito o publicação “*The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savana*” (Os cerrados do Brasil: ecologia e história natural de uma savana neotropical). Corroborando com esta afirmativa, o IBGE (2012) classifica o termo Savana como prioritário e Cerrado como sinônimo regionalista, por apresentar uma fisionomia ecológica homóloga à da África e à da Ásia.

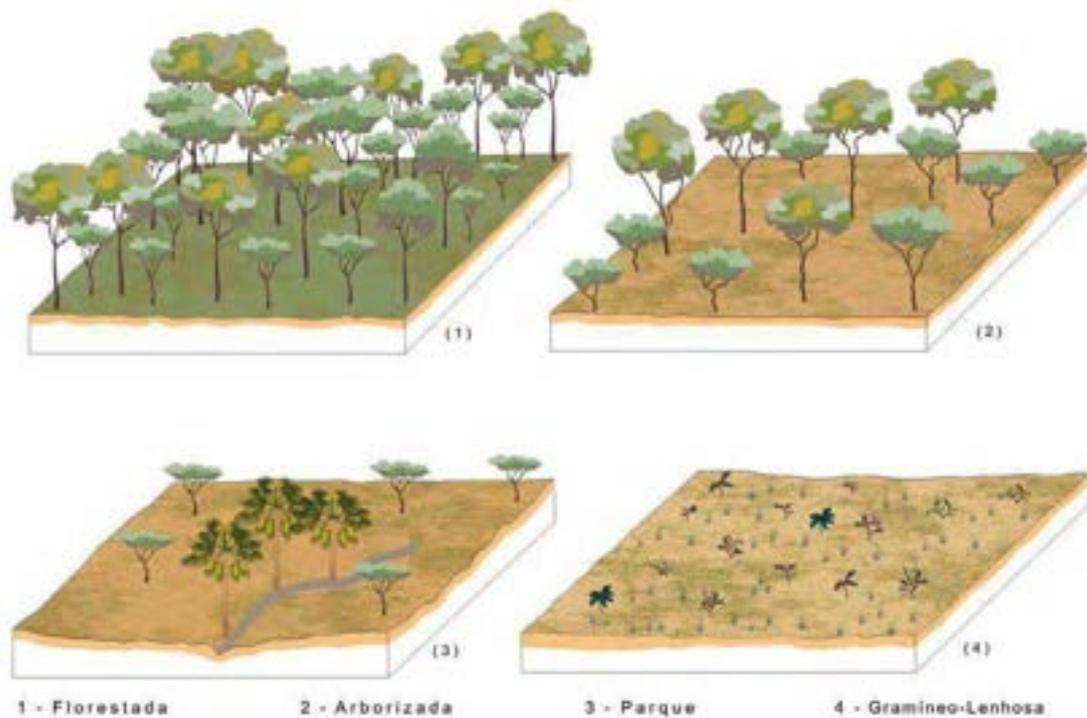
Conforme estabelecido no Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE 2012), a Savana foi subdividida em quatro subgrupos de formação (Figuras 1 e 2): Florestada (cerradão); Arborizada (campo cerrado, cerrado ralo, cerrado típico e cerrado denso); Parque (campo sujo de cerrado, cerrado de pantanal, campo de murundus e campo rupestre) e Gramíneo-Lenhosa (campo limpo de cerrado).

Figura 1 - Perfil das diferentes fisionomias da Savana (Cerrado)



Fonte: IBGE (2012).

Figura 2 - Diferentes fisionomias da Savana (Cerrado)



Fonte: IBGE (2012).

Considerando as diversas acepções, e estudos conduzidos ao longo dos anos por diferentes pesquisadores e estudiosos sobre o assunto, neste Capítulo o termo Savana será aplicado para o Cerrado, incluído todos os aspectos a este envolvidos. Neste contexto, é muito importante a definição conceitual sobre o termo Savana, sua origem e distribuição uma vez que as diferentes acepções trazem implicações diretas e indiretas na condução de políticas públicas associadas a conservação da biodiversidade e ao uso e ocupação dos solos e da água, uma vez que estas fisionomias exercem um papel fundamental para manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais; de maneira simultânea e igualmente importante, a sua origem e formação está associada a um longo período de desenvolvimento em diferentes regiões do mundo, inclusive no Brasil, fato que ratifica a importância destas fisionomias.

1.2 Contextualização

1.2.1 Origem das Savanas

As mudanças climáticas que aconteceram entre os períodos Terciário e o Quaternário durante o Mioceno quente e o Pleistoceno com as glaciações (Rull, 2008) favoreceram a expansão das Savanas (Fernandes 2000), em especial as Savanas campestres onde teriam o predomínio de espécies das famílias Poaceae e Cyperaceae (Ranzi, 2000). Para Ledru (2002), as condições climáticas extremas, com o predomínio do clima seco, e declínio de precipitação com redução na disponibilidade de umidade favoreceu a ocorrência de incêndios (Oliveira Filho;

Ratter, 2002) e, conseqüentemente, fomentou a ocorrência de fisionomias xeromórficas entre estas as Savanas (Lock, 2006).

Durante o Holoceno de acordo com Furley (1999) a umidade foi restaurada, houve o aumento das chuvas, e conseqüentemente o processo de lixiviação do solo tornou-se mais intenso; que de acordo com Sarmiento (1984) contribuiu para aumentar a acidez edáfica e concentração de alumínio, características que em conjunto, contribuíram para adaptações e especiações, favorecendo a expansão das Savanas e a retração das Florestas, uma vez que as Florestas se encontravam em desvantagem competitiva em relação as Savanas (e.g. Furley, 1999). A retração da Floresta causada pelas chuvas reduzidas de acordo com Sarmiento (1984) provavelmente desencadeou uma série de mudanças ambientais, entre estas a diminuição da ciclagem de nutrientes, devido à diminuição da produção de serapilheira no solo. Desta maneira, durante este período também houve o favorecimento do aumento de espécies esclerófilas e especiações de ecótipos florestais de larga dispersão que se adaptaram a ambientes com restrições de água (Rizzini, 1997) e altas concentrações de alumínio edáfico. Entre as espécies vicariantes de ecótipos florestais relacionadas por Rizzini (1997) tem-se: *Aspidosperma tomentosum* Mart. (Apocynaceae), *Agonandra brasiliensis* Miers ex Benth. e Hook. f. (Opiliaceae), *Dimorphandra mollis* Benth. (Fabaceae), *Caryocar brasiliense* Cambess (Caryocaraceae) e *Terminalia fagifolia* Mart. (Combretaceae). De acordo com Méio *et al.* (2003) estes ecótipos devem ter superado as restrições impostas pelo clima mais seco que por sua vez devem ter restringido fortemente a distribuição de espécies florestais em todo o Cerrado, afirmativa também descrita por Reis (2014).

Assim, os continentes passaram por mudanças climáticas em diferentes épocas geológicas (Cruz Júnior *et al.*, 2005) e no final do Terciário e ao longo do Quaternário, as mudanças na ocupação da paisagem (Raven; Axelrod, 1974) favoreceram a formação de Savanas e Florestas, cuja expansão destas duas fisionomias estariam relacionadas a umidade ambiental (e.g. Gottsberger; Morawetz, 1986; Scheel-Ybert *et al.*, 2003). Neste sentido, conforme descrições de Cruz Júnior *et al.* (2005) para a América do Sul e de Salgado-Labouriau *et al.* (1998) a origem e a formação das Savanas no Brasil Central ocorreram dentro de pulsações climáticas do Quaternário, quando as Florestas se expandiram durante os períodos interglaciais sobre o espaço das Savanas e retraíram-se durante as glaciações.

Potter e Szatmari (2009) colaborando com o descrito por Cruz Júnior *et al.* (2005), descrevem que durante o Terciário, o Mioceno é um tempo geológico de grande importância, para a distribuição da vegetação, uma vez que durante este período ocorreram diferentes transformações, associadas a eventos geológicos que resultaram na configuração moderna dos continentes, além da ocorrência de diferentes processos biológicos que contribuíram para atual biodiversidade encontrada no planeta, colaborando com as classificações atuais propostas para a vegetação no mundo.

De acordo com Rossetti *et al.* (2013) durante o Mioceno (ca. de 23 milhões de anos A.P) a Terra experimentou a mais significativa elevação do nível do mar, contudo as magnitudes destes eventos permanecem controversos, com estimativas variando de 180 m (Haq *et al.* 1987) para algumas dezenas de metros acima do nível do mar atual (Miller *et al.* 2005), tendo como consequência, as incursões marinhas em direção ao continente. Neste período as condições climáticas favoreceram a substituição de áreas com Florestas por Savana (Barreda; Palazzesi, 2007) e em paralelo, o nível do mar experimentou uma queda de cerca de 50-70 m, em resposta a expansão da camada de gelo da Antártida. Rossetti *et al.* (2013), ressaltam

também, que os eventos transgressivo-regressivos foram registrados em diversas áreas continentais em todo o mundo, particularmente as áreas localizadas perto das costas litorâneas atuais, os quais contribuíram para a configuração atual das condições edáficas e da vegetação. Entretanto, por muito tempo diferentes autores (e.g. Suguio *et al.*, 1986), têm considerado a origem destas fisionomias como continental, reiterando a importância da formação da vegetação por um longo período, e associando a diferentes processos ambientais.

De acordo com Ledru (1993) entre 40.000 e 30.000 anos A.P., a paisagem do Cerrado do Brasil era formada por um mosaico dinâmico de Savanas tropicais e subtropicais, além de Florestas. De acordo com Raven e Axelrod (1974), durante as glaciações, entre os fatores importantes para expansão das Savanas, estão a redução da umidade inicialmente, seguida pelo aumento da acidez e toxicidade edáfica, além de incêndios frequentes e ciclos recorrentes de secas que ocorreram nos trópicos. Para Salgado-Labouriau (2005), a fase seca terminou por volta de 10.000 anos antes do presente (A.P.), na América do Sul (Brasil Central) perdeu até ca. 7.000 (A.P.) e depois de 5.000 (A.P.) ocorreu a formação de lagos, pântanos e veredas no Brasil Central e o clima passou para semi-úmido com estação seca entre 3 a 5 meses.

Entre 28.000 e 20.000 anos A.P. Salgado-Labouriau (2005) sugere que conjuntos de polimorfos demonstraram a existência de pólen arbóreo de alguns gêneros de ocorrência no Cerrado como *Byrsonima*, *Neea*, *Andira*, *Cassia*, *Stryphnodendron* e outros gêneros das famílias Fabaceae, Melstomataceae, Combretaceae, Myrtaceae, Palmae e outras, contudo em torno de 40% a 60% os registros estão relacionados ao pólen de Poaceae. Estes registros indicam a importância do extrato herbáceo, incluindo da família Poaceae para a composição da flora e da estrutura da vegetação do Cerrado nas diferentes regiões.

A ocorrência de áreas isoladas de Cerrado, na Floresta Amazônica, Caatinga e Floresta Atlântica, levou vários autores a proporem que no passado houve uma distribuição mais ampla da área contínua do Cerrado no Brasil Central (e.g. Ab'Saber, 1963, 1971; Rizzini, 1979; Cole, 1986; Prance, 1996). Estes autores, relacionam que a distribuição mais extensa da vegetação seria decorrente de um clima mais seco o qual teria favorecido a distribuição da sua vegetação no passado. Desta maneira, a hipótese de uma distribuição pleistocênica para as áreas disjuntas é baseada nas similaridades florísticas e no baixo nível de endemismos: (1) A similaridade florística entre as áreas disjuntas dos cerrados com a flora da sua área contínua de ocorrência no Brasil Central, e (2) o baixo nível de endemismo de espécies nas áreas disjuntas da Amazônia e da Floresta Atlântica (Gottsberg; Morawetz, 1986; Prance, 1996). Esta interação de acordo com Henriques (2013) refere-se aos registros de pólen no período Quaternário que indicam a ocorrência da flora do Cerrado, nas áreas intermediárias entre a região contínua do Cerrado do Brasil Central e as áreas disjuntas nos outros biomas.

De acordo com alguns autores (e.g. Ledru *et al.*, 1996, 1998; Behling; Hooghiemstra, 2001), diferentes estudos constataram a ocorrência de pólen de *Curatella americana* (Dillenciaceae) e de outras espécies do Cerrado, em áreas atualmente com Floresta Atlântica, indicando que a vegetação do Cerrado do Brasil Central se expandiu além do seu limite atual. Assim, as áreas disjuntas de Cerrado atualmente isoladas, descritas para diferentes regiões do Brasil, são remanescentes desta distribuição mais extensa no passado (e.g. Behling, 1998); de maneira simultânea a hipótese da distribuição do Cerrado, na área da Floresta Amazônica durante os períodos mais secos do final do Pleistoceno e Holoceno, para explicar as ocorrências das áreas disjuntas de Cerrado neste bioma ainda é controversa (Colinvaux, 1997; Colinvaux *et al.*, 1996). As evidências baseadas na presença de pólen, indicadores da ocorrência de vegetação

de Cerrado (*s.l.*), apontam que para as áreas atualmente com Florestas úmidas no limite sudoeste e sul da Amazônia, esta vegetação esteve presente em vários períodos no final do Pleistoceno, a saber: 65.000 anos A.P., 49.000 anos A.P., 41.000 anos A.P., 23.000 anos A.P., 13.000 anos A.P. (Behling; Hooghiemstra, 2001; Reis, 2014).

A ocorrência atual das espécies do Cerrado está associada principalmente à capacidade destas espécies colonizarem os mais diversos ambientes, comprovada através de pesquisas, e também associadas ao longo período de formação e adaptação. Além disso, os estudos conduzidos em diferentes momentos e autores, têm demonstrado o alto grau de endemismos e a ocorrência restrita de muitas espécies apenas na área core do Brasil Central com ocorrência comum de espécies nos estados limítrofes, como Bahia, Tocantins, Piauí e Minas Gerais, sugerindo uma flora bastante peculiar e característica nesta região. Esta afirmativa também corrobora com Eiten (1972) e com estudos conduzidos por Reis (2014), indicando que a área de distribuição do Cerrado concentra-se na região do Planalto Central, condições que reiteram a importância destas áreas também para adoção de políticas públicas para conservação e preservação dos recursos naturais (biodiversidade, solos e recursos hídricos), e de maneira simultânea o fomentar de maneira ampla a utilização de boas práticas agropecuárias.

1.2.2 Teorias sobre a Origem das Savanas

Entre as teorias sobre a origem das Savanas, Alvin (1954) defendeu a origem relacionada à junção das Teorias Climática, Biótica e Pedológica, e relacionou as condições edáficas (deficiência mineral e a drenagem do solo) são fatores preponderantes para a ocorrência da vegetação. Goodland (1971a,b) e Goodland e Ferri (1979) fizeram uma relação entre deficiência mineral x drenagem nos solos; já Goodland e Pollard (1973) em seus estudos, não encontraram correlação negativa significativa entre o gradiente de vegetação e a presença de alumínio. Goodland e Pollard (1973), sugeriram que o principal efeito do alumínio no solo seria o de competir com as bases trocáveis pelos mesmos sítios de troca no complexo coloidal do solo. A ideia de que o alumínio promove o empobrecimento ainda maior do solo ficou conhecida como hipótese do oligotrofismo aluminotóxico (Goodland, 1971b) a qual foi adicionada à hipótese do escleromorfismo oligotrófico.

A Teoria Climática, defendida por Eiten (1994), ressalta que as chuvas fortes e recorrentes de ocorrência durante o Quaternário, contribuíram para a lixiviação e diminuição dos nutrientes no solo, aumentando a acidez edáfica, e estas características, em conjunto, promoviam a seleção das espécies mais adaptadas. Assim, para Eiten (1994) a vegetação do Cerrado é um resultado indireto do clima, ao qual foi induzida pelo clímax edáfico.

Coutinho (1990) relaciona a Teoria Pirogênica, ressaltando que sucessivos incêndios selecionam a ocorrência das espécies. Esta teoria está alicerçada no registro de carvão vegetal em diferentes regiões e períodos, especificamente na América do Sul os registros datam de 36.000 anos (A.P.) (e.g Ledru *et al.*, 1996). Contudo, esta Teoria recebe críticas, por tratar as Savanas como fisionomia secundária às fisionomias florestais, uma vez que é reconhecido que as condições edáficas, hidrológicas e topográficas em algumas regiões não permitem a ocorrência de florestas (Fernandes 2000). Contudo, é importante destacar que mesmo que fogo não foi o fator preponderante para condicionar a origem das Savanas, este atributo tem condicionado as suas fisionomias ao longo dos anos, inclusive em áreas do Brasil.

A origem antrópica das Savanas também sempre foi discutida por diferentes autores, entre estes Beard (1953) e Walker (1987) que descrevem a ocorrência do fogo para o estabelecimento da vegetação. Para Beard (1953), a origem desta vegetação está relacionada a presença do fogo e avanços no desmatamento. Walker (1987) relaciona além da ocorrência do fogo e a presença de herbívoros, outros fatores também contribuem em conjunto na variação da vegetação, indicando o clima, a ocorrência de chuvas e as condições edáficas. Colaborando com a defesa da origem antrópica, Bayon *et al.* (2012) ressaltam que aproximadamente 3.000 anos A.P, ocorreu uma mudança importante na vegetação na África Central, quando áreas com Florestas foram abruptamente substituída por Savanas, relacionando não somente as mudanças climáticas, mas também ao intemperismo químico, reconstruído a partir de análises geoquímicas de um núcleo de sedimentos marinhos; estes autores relacionam ainda, a evidência de que intemperismo também foi contemporâneo a intensificação do uso da terra, provocados principalmente pelo avanço da agricultura e tecnologia de fundição do ferro.

Outra teoria proposta por Ferri (1977) refere-se à Teoria da origem evolutiva e sucessional, onde diferentes fatores, entre estes o fogo, avanços em processos de antropização e restrições de água, condicionaram a ocorrência das Savanas em diferentes regiões. Para Ribeiro e Walter (2008) a origem da vegetação tem como fatores determinantes a estacionalidade climática, baixo nível nutricional dos solos e ocorrência de fogo, concordando que estes fatores em conjunto são determinantes primários da vegetação, e a variação destes fatores no espaço e no tempo, são responsáveis pela diferenciação da vegetação.

Trabalhos conduzidos por Goodland e Pollard (1973) mostraram um paralelo entre um gradiente fisionômico do Cerrado e um gradiente de fertilidade do solo, numa correlação entre a área basal por hectare e concentrações de fósforo, nitrogênio e potássio, deixando claro que a fertilidade do solo não seria necessariamente a causa do gradiente fisionômico. Contudo, alguns autores entre estes Eiten (1982), atribuem uma relação de causa e efeito à questão da fertilidade do solo no Cerrado, demonstrando que pode haver variação fisionômica a depender das condições edáficas. De acordo com Medina e Silva (1990), algumas características ecológicas encontradas no Cerrado parecem apoiar a hipótese de interação entre fatores ambientais como determinantes para sua origem e ocorrência, ressaltando que o fogo e as secas, as condições edáficas e a água afetam diretamente o porte das Savanas Neotropicais, ideia também aceita por Lock (2006) que propõe hipóteses sobre o desenvolvimento da vegetação neotropical, por meio da ação combinada de clima, solo e fogo. De acordo com Franco (2002) a chance das espécies sobreviverem no Cerrado dependeria da sua capacidade de drenar a água das camadas superficiais do solo, manter reservas de energia subterrâneas, e continuar crescendo apesar dos incêndios e da estação seca. Estas condições podem ser observadas, quando se compara as diferentes fisionomias que compõe o Cerrado, a interação de fatores tem delineado a vegetação e condicionado a ocorrência das espécies ao longo dos anos.

De uma maneira geral, a origem das Savanas, especificamente sobre o Cerrado no Brasil, está relacionada a evidências florísticas e paleontológicas, registros de carvão vegetal, abordagens filogenéticas, incluído também a influência conjunta de fatores climáticos, edáficos e a ocorrência do fogo. Considerando o período geológico de formação e especiação das espécies ao longo dos anos, é fundamental a adoção de medidas de conservação claras, uma vez que a manutenção destas fisionomias e de todos os serviços ecossistêmicos e ambientais estão essencialmente vinculadas a implementação de políticas públicas direcionadas.

1.3 Distribuição das Savanas

Diferentes autores procuram descrever a distribuição das Savanas tropicais para os continentes Americano, Africano, Asiático e a Oceania, especialmente a Austrália.

Na África, compreendem cerca de 15,1 milhões de km², o que representa 50% desse continente. Extensas áreas de savana podem ser encontradas também na Índia, Austrália, sudeste da Ásia, América Central e ilhas do Pacífico. No continente africano, além dos distúrbios causados pelo fogo, pastejo e outras atividades antrópicas, a disponibilidade hídrica é um fator limitante para explicar a coexistência de árvores e campos (Sankaran *et al.*, 2005). Nas Américas, as Savanas, além de serem observadas na América Central e Cuba, estendem-se também em duas grandes áreas na América do Sul; ao Sul do equador, além do cerrado, no Brasil, os *Llanos de Mochos*, na Bolívia e o Chaco, por sua vez, ocupa uma área que abrange a porção Leste da Bolívia, à face Norte da Argentina e a região Oeste do Paraguai, representada por um mosaico vegetacional, que abriga fisionomias arbustivo-arbóreas, Savanas parque e Savanas inundáveis (Solbrig, 1996). Ao Norte do equador, cerca de 500.000 km² são ocupados por fisionomias savânicas que incluem os *Llanos do Orinoco*, uma Savana gramínea com árvores esparsas, que vai do Oeste da Colômbia à região central da Venezuela; a *Gran Sabana* na Venezuela; as Savanas Costeiras das Guianas, as Savanas do Rio Branco-Rupunuri na Amazônia brasileira, conforme relatos de alguns autores (e.g. Solbrig, 1996).

De acordo com Borghetti *et al.* (2023) as Savanas da América do Sul representam entre 8 e 10% da cobertura das savanas globais, e de forma dispersa, cobrem pouco mais de 2,29 milhões de quilômetros quadrados no continente, representando o espectro mais úmido e mais biodiverso das Savanas globais. No Brasil, o Cerrado é considerado por diferentes autores a Savana tropical mais rica do mundo, ocupando a posição central e estratégica na América do Sul; ocorre desde 2° até 24° de latitude Sul e de 41° a 60° de longitude Oeste, e ocupa uma amplitude geográfica de cerca de 22° de latitude e 19° de longitude, originalmente de 204 milhões de hectares (Embrapa, 2020), correspondendo a 24 % do território nacional. A posição estratégica contribuiu para a troca de espécies entre a Mata Atlântica, Caatinga, Floresta Amazônica e Pantanal, colaborando com a sua biodiversidade atual, apresentando alto grau de endemismos, contudo ainda pouco estudada por diferentes aspectos.

Estas condições contribuem para consolidar oportunidades associadas a valorização de ativos ambientais e de preservação dos recursos naturais, uma vez que a substituição de habitats naturais irá interferir não somente na biodiversidade local e regional, mas principalmente nos serviços ecossistêmicos e ambientais oferecidos.

Conforme Ribeiro e Walter (1998; 2008) e dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2007; 2019), o Cerrado está localizado principalmente no Planalto Central do Brasil, podendo ocorrer em outros estados do Brasil (Figura 3). No Nordeste, pode ser encontrada especialmente no Oeste da Bahia, sendo uma continuação do cerrado de Goiás, Tocantins e sul do Piauí. Tais áreas apresentam características em comum com a região Centro Oeste do Brasil, seja pelas fisionomias, ou pela presença de espécies típicas e/ou de ampla distribuição.

Figura 3 - Área de Cerrado conforme definição do IBGE



Fonte: IBGE (2019); elaborado por Adolfo C.A. Junior (2024).

Conforme Ratter *et al.* (2000), a alta diversidade de espécies, entre plantas, fungos e animais, também pode estar relacionada à idade e às mudanças climáticas que ocorreram principalmente durante o Pleistoceno. Como paralelo antagônico aos relatos desta diversidade e importância o Cerrado tem sido suprimido, principalmente pelo avanço nos processos de antropização, ainda que aconteça conforme previsão legal (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012). Assim, o Cerrado pelas suas particularidades, biodiversidade e a importância se tornou o foco da atenção mundial e hoje é considerado um dos maiores “hotspots mundial” já sinalizada por Myers *et al.* (2000) e Mittermeier *et al.* (1998, 2004, 2011), ultrapassando os limites do Brasil, se estendendo para Bolívia e Paraguai. Números do MMA (2023) indicam que 8,21% de seu território legalmente protegido por unidades de conservação; desse total, 2,85% são unidades de conservação de proteção integral e 5,36% de unidades de conservação de uso sustentável, incluindo RPPNs (0,07%), demonstrando o papel estratégico dos produtores rurais para ampliar as áreas conservadas no campo, extrapolando o previsto no Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) em Áreas de Reserva Legal e Áreas de Preservação Permanente (APP).

Há uma ampla concordância, entre diferentes autores, que a flora do Cerrado é bastante diversificada, independentemente da abordagem utilizada nos diferentes estudos. Para Eiten (1994), o Cerrado possui a flora mais rica em plantas vasculares do planeta, excetuando-se algumas poucas regiões de Florestas Tropicais.

Diferentes autores (e.g. Reis *et al.*, 2014) tem procurado ao longo dos anos caracterizar a composição florística e a estrutura do Cerrado em diversas regiões no Brasil, e os estudos têm demonstrado as particularidades e a importância do Cerrado sobre diferentes aspectos. Além da sua importante biodiversidade, o Cerrado desempenha um papel fundamental no processo de distribuição dos recursos hídricos pelo país, sendo o local de origem de grandes bacias hidrográficas brasileiras e do continente sul americano, Amazônica, Prata/Paraguai e São Francisco, e de maneira simultânea também exerce um papel enorme na proteção e manutenção de nascentes de oito das doze bacias hidrográficas mais importantes do Brasil, Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico-Nordeste-Occidental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico-Leste, Paraná, Paraguai - Prata/Paraguai (Lima; Silva, 2007, 2008), portanto essencial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais.

Figura 4 - Área de Cerrado na região do MATOPIBA, Brasil



Fonte: Marcelo Braz de Oliveira Braga (2024).

1.4 Adaptações das Espécies

As espécies nativas de ocorrência em áreas de Cerrado estão adaptadas a sazonalidade climática e condições edáficas (IBGE, 2007), bastante características. A precipitação ocorre predominantemente entre os meses de outubro a abril, com certa restrição hídrica nos demais meses do ano (Silva *et al.*, 2008). Além de ter efeitos diretos sobre a florística nativa do Cerrado e os aspectos gerais da vegetação, a sazonalidade climática e as condições edáficas exercem um papel importante também nas diferentes atividades empresariais e de agronegócio que são conduzidas na região, além de ter efeito direto na condução e sucesso de programas de restauração.

A redução pluviométrica diminui a disponibilidade de água para vegetação (e.g. Franco, 2002) e eleva a evapotranspiração (Bucci *et al.*, 2005) o que culmina com a perda da folhagem de algumas espécies arbóreas e arbustivas, e a morte da parte aérea de algumas espécies herbáceas durante período seco (Sarmiento, 1983; Filgueiras, 2002; Bucci *et al.*, 2005), consolidando uma vegetação formada por espécies decíduas ou semi-decíduas que (e.g. Haridasan, 2000), que colaboram com a formação de serrapilheira no solo, torna-se uma importante fonte de nutrientes para as plantas, contribuindo com a ciclagem de nutrientes no sistema melhorando as condições edáficas uma vez que os solos são naturalmente distróficos em sua grande maioria (e.g. Reatto *et al.*, 2008). Entretanto, a biomassa formada a partir do acúmulo da serrapilheira na estação seca, (Miranda *et al.*, 2002) associada ao denso estrato herbáceo, serve também como material combustível para a ocorrência de fogo de calor e conseqüentemente queimadas frequentes na região.

A relação histórica entre sazonalidade climática, baixa fertilidade dos solos e ocorrência natural de queimadas tem moldado, nos últimos milhares de anos, as diferentes estratégias vegetativas e reprodutivas das plantas do Cerrado (e.g. Bucci *et al.*, 2005; Oliveira, 2008). Desta maneira, as espécies da flora lenhosa do Cerrado desenvolveram variadas estratégias de alocação de recursos para lidar com diferentes fatores durante as fases do ciclo de vida (e.g. Oliveira; Marquis, 2002; Oliveira, 2008). De acordo com Cotrim (2019), entre as estratégias importantes de adaptação destas espécies, o comportamento fenológico pode ter se desenvolvido associado à resposta evolutiva à sazonalidade climática (Mantovani; Martins 1988; Lenza; Klink 2006; Oliveira, 2008), à ocorrência do fogo (e.g. Coutinho, 1990; Felfili *et al.*, 1999), e às ações de polinizadores (Mantovani; Martins, 1988), dispersores (Oliveira, 2008) e herbívoros (Oliveira; Marquis 2002). Estas estratégias em conjunto, contribuem para maximizar a reprodução e a sobrevivência das espécies (Oliveira, 2008; Reis, 2014).

Quando são descritas às fenofases vegetativas observadas nas plantas de ocorrência no Cerrado, algumas espécies possuem adaptações para superar o estresse hídrico, como caules subterrâneos com funções de reserva (xilopódios) e com gemas que permitem a rebrota das plantas após a estiagem e/ou as queimadas; ou em sua grande maioria, um sistema radicular bem desenvolvido e profundo (e.g. Eiten, 1972; Oliveira *et al.*, 2005), desde plântulas; adaptação que contribui para produzir folhas durante o período seco e manter a folhagem ao longo do ano (e.g. Franco *et al.*, 2005; Scariot *et al.*, 2005; Lenza; Klink, 2006; Oliveira, 2008). Algumas espécies decíduas perdem totalmente as folhas por um curto período de tempo durante a estação seca (Sarmiento *et al.*, 1985; Franco *et al.*, 2005; Lenza; Klink, 2006), fato que contribui para minimizar a perda de água durante esta estação seca. Colaborando, Sarmiento *et al.* (1983) ressaltam que as condições físicas e atributos presentes no Cerrado contribuíram para a ocorrência de espécies decíduas e semi-decíduas, com bulbos e pseudobulbos, caule tortuoso,

súber espesso, raízes profundas e esclerofilia. Outras características também exercem importância, para as espécies de ocorrência no Cerrado, entre estas: a presença de caules aéreos muito espessos com acúmulo de cortiça para proteção; a presença de folhas com estômatos abaxiais e cutícula espessa, com pilosidades que minimizam perdas de água; acúmulo foliar de alumínio em algumas espécies; ajustamento osmótico das raízes, possibilitando a entrada de água nos meses secos e a continuidade da transpiração e da fotossíntese, conforme Campanella e Bertiller (2008).

Sobre o acúmulo de alumínio (Al) em plantas, sabe-se que algumas espécies apresentam essa capacidade (e.g. Haridasan, 1982), entre estas podem ser ressaltadas: *Qualea multiflora* Mart e *Vochysia thyrsoidea* Pohl (Vochysiaceae); e gêneros como: *Neea* (Nyctaginaceae), *Strychnos* (Loganiaceae), *Miconia* (Melastomataceae), *Roupala* (Proteaceae), *Psychotria* e *Palicourea* (Rubiceae). Esta característica adaptativa para as plantas nativas do Cerrado, demonstra que a presença do alumínio no solo não causa nenhum efeito sobre o crescimento vegetativo, reprodução ou suas funções metabólicas, permitindo que as espécies consigam se adaptar em diferentes condições edáficas.

Coutinho (1990) e Miranda *et al.* (2002) ressaltaram que a ocorrência do fogo contribuiu, ao longo do tempo, para que as espécies desenvolvessem o súber espesso e xilópodos. Este atributo, contribuiu para adaptações de plantas herbáceas perenes, árvores e arbustos com poucas ramificações, em algumas espécies frequência de reprodução vegetativa e a indução ao florescimento associadas a presença do fogo. Considerando estas afirmativas Moreira (2000), entre outros autores, também descreveu que o fogo exerce influência direta na distribuição e composição florística, podendo agir de forma seletiva para ocorrência e adaptação.

Para a ocorrência de espécies anuais e perenes, Filgueiras (2002) ressaltou que as espécies perenes apresentam sistemas radiculares profundos e esclerofilia; já para as espécies anuais este mesmo autor, descreve a capacidade de armazenar sementes no solo (resistir ao fogo e à seca), além de possuírem bancos de sementes persistentes e a curta estabilidade climática é suficiente para recolonizar um ambiente. Para Franco (2002), algumas características são importantes na adaptação e distribuição das espécies que compõem o Cerrado, ressaltando o acúmulo de carbono na biomassa (favorecido pela alta taxa fotossintética), o mutualismo com fungos micorrízicos, o escleromorfismo oligotrófico e o sistema radicular desenvolvido.

Considerando a fenologia reprodutiva das espécies, o ajustamento da floração das espécies lenhosas do Cerrado ainda tem sido bastante discutido, embora alguns autores descrevam que o florescimento da maioria das espécies acontece ao longo de todo ano (e.g. Mantovani; Martins, 1988; Batalha *et al.*, 1997; Batalha; Mantovani, 2000; Batalha; Martins, 2004; Lenza; Klink, 2006), com pico de floração após as chuvas. Desta forma, fatores como precipitação, temperatura, fotoperíodo e ocorrência de fogo tendem a induzir a floração (e.g. Munhoz; Felfili *et al.*, 2007), podendo inibir ou retardar esta fase nas diferentes espécies. Além disso, a disponibilidade ou competição por polinizadores e o período ótimo para dispersão também podem ser importantes para o ajustamento do período de floração conforme os relatos de Fernandes-Bulhão e Figueiredo (2002) e de Oliveira (2008). Assim, as espécies lenhosas do Cerrado podem apresentar diferentes períodos de floração, frutificação e dispersão das sementes, indicando estratégias distintas de ajustamento aos condicionantes bióticos e abióticos (Mantovani; Martins, 1988; Lenza; Klink, 2006; Munhoz; Felfili *et al.*, 2007).

Conforme Lenza e Klink (2006), as variações no comportamento fenológico das espécies sugerem diferentes estratégias adaptativas e os mesmos fatores condicionantes, uma vez que as espécies respondem de forma diferenciada aos estímulos do meio ao qual se encontram. A convergência adaptativa a estas estratégias por várias espécies nativas, têm indicado que a vegetação do Cerrado é antiga, e que as condições físicas do ambiente favoreceram a atual diversidade, ao ponto da seleção natural ajustar as frequências dos genes responsáveis por estas adaptações ao longo do tempo (e.g. Ridley, 2006). Estas características em conjunto só reiteram a importância do Cerrado não somente pela biodiversidade, período de formação e especiação das espécies, mas também por todos os atributos ambientais associados.

De maneira complementar, as características adaptativas e a fenologia das espécies do Cerrado são fundamentais para o planejamento e condução de ações associadas de recuperação e/ou restauração de ambientes degradados, inclusive para atender a uma demanda para o cumprimento do Código Florestal Brasileiro - Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Brasil, 2012), que trouxe entre outros instrumentos o Cadastro Ambiental Rural (CAR) que é uma importante ferramenta de gestão para o uso e ocupação do solo fundamental para nortear a ocupação de áreas consolidadas, preservação e conservação, mas essencial para a condução de ações de restauração de vegetação nativa nas diferentes bacias hidrográficas.

1.5 Oportunidades

O Cerrado exerce importância estratégica para manutenção da segurança alimentar, da biodiversidade e dos recursos hídricos em razão de suas características econômicas, sociais e ambientais, pois abrange uma porção importante do país (IBGE, 2004), e merece destaque não somente pelo período de formação, mas principalmente pelas suas características, localização, representatividade, particularidades, índices de produtividade de diferentes *commodities*, geração de emprego e renda, conhecimento tradicional e também no avanço no processo de antropização representado pelas substituições contínuas de habitats naturais.

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) (OECD-FAO, 2023) preveem um aumento global na procura de alimentos em mais de 13% até 2032, principalmente como consequência do crescimento da população mundial que tende a crescer de 7,9 bilhões de pessoas em 2022, para 8,6 bilhões de pessoas em 2032. Associada a grande demanda global por alimentos outros aspectos a exemplo das questões geopolíticas e ambientais, alterações climáticas adversas, questões fitossanitárias e os aumentos nos custos de produção se mostram relevante no contexto do Cerrado que é o grande produtor de *commodities* que alavancam a economia brasileira, mas também essencial para a conservação dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos.

A atual legislação brasileira permite a ocupação de áreas localizadas no Cerrado em até 80%, respeitando o percentual de áreas destinadas a Reserva Legal e as Áreas de Preservação Permanente (APP) conforme previsto no Art. 12 da Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal). Portanto, o processo de ocupação no Cerrado acontece naturalmente conforme previsão legal, e a aplicação efetiva da Lei Federal nº 12.651/2012, a qual também está associada a um arcabouço jurídico rígido norteia o uso e ocupação do solo, medidas de conservação, preservação e restauração conforme também previsto na Lei Federal nº 6.938, de 31/08/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente), na Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro

de 1998 (Lei de Crimes Ambientais) e do Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008 que a regulamenta, na Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho 2000 (Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC), na Lei Federal nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006 (Lei da Mata Atlântica), na Lei Federal nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021 (Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais - PSA) e na Lei Federal nº 14.590, de 24 de maio de 2023 (Marco Regulatório da Gestão de Florestas Públicas por meio de concessões, altera a Lei Federal nº 11.284, de 2 de março de 2006), que de maneira simultânea podem gerar alternativas sobre o processo de uso e ocupação do solo, a restauração de áreas, a valorização de ativos ambientais essenciais para a preservação de grandes remanescentes de vegetação nativa, permitindo inclusive a exploração de outras atividades não madeireiras e o aproveitamento e a comercialização de créditos de carbono.

Desta maneira, o uso mais sustentável dos recursos naturais, encontra-se lastreado em uma legislação vasta, mas também nos princípios da Convenção sobre Diversidade Biológica (2000) onde a utilização sustentável da diversidade biológica, entre outros aspectos, deve estar associada a: (i) Adoção de medidas relacionadas à utilização de recursos biológicos para evitar ou minimizar impactos negativos na diversidade biológica; (ii) Proteção e encorajamento sobre a utilização de recursos biológicos de acordo com práticas culturais tradicionais compatíveis com as exigências de conservação ou utilização sustentável; (iii) Realização de apoio a populações locais na elaboração e aplicação de medidas corretivas em áreas degradadas onde a diversidade biológica tenha sido reduzida; e (iv) Estimular a cooperação entre suas autoridades governamentais e o setor privado na elaboração de métodos de utilização sustentável de recursos biológicos. Estes aspectos em conjunto devem ser considerados, pois o Cerrado exerce uma importância ímpar também nas questões sociais, os saberes e o conhecimento tradicional devem ser vistos de maneira integrada, considerando inclusive a importância histórica.

Complementar aos diferentes instrumentos que trazem como prioridade o uso sustentável dos recursos naturais, é fundamental e urgente a implementação dos diferentes instrumentos trazidos pelo Código Florestal em especial no que diz respeito ao Cadastro Ambiental Rural (CAR) que lastreia o monitoramento, a fiscalização e também permite visualizar de maneira clara e objetiva as áreas produtivas, a extensão dos ativos e passivos ambientais associados a áreas rurais, além de demonstrar as áreas degradadas passíveis de restauração e a identificação de áreas que podem e devem ser valorizadas e associadas ao PSA, sendo portanto, uma importante ferramenta de gestão fundamental para nortear o processo de ocupação no Cerrado, de maneira complementar a reposição florestal e a implementação das Cotas de Reserva Ambiental (CRA) são instrumentos importantes para garantir a manutenção e/ou a restauração da vegetação nativa. Outros passos importantes para ampliar as áreas conservadas e a manutenção da vegetação é a implementação de Unidades de Conservação e a implementação de políticas públicas específicas para o Cerrado como acontece na Floresta Amazônica e na Mata Atlântica, as quais também fomentem a maximização da utilização de áreas abertas ampliando a adoção de boas práticas, incluído, quando possível, a Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF), ampliação de áreas irrigadas em áreas com disponibilidade hídrica, restauração de pastagens degradadas e/ou ainda o aproveitamento de áreas abertas com pouco aproveitamento com consórcios de sistemas agroflorestais, a fim de otimizar o aproveitamento de áreas abertas e reduzir a pressão sobre aberturas de novas áreas ou conversão de vegetação nativa.

Considerando a importância do Cerrado, os olhares do mundo neste momento se voltam para o Brasil, mais especificamente para a região que abrange os estados do Maranhão Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), por ser considerada uma das grandes últimas fronteiras agrícolas do mundo, com uma área aproximada de 73 milhões de hectares, e cerca 66,5 milhões de hectares estão no Cerrado (91%), e atualmente é responsável por cerca de 12% do total da produção de grãos produzido no Brasil (Embrapa, 2023); de maneira simultânea, esta área também exerce um papel estratégico para a preservação da vegetação nativa em grandes áreas.

Neste contexto, é fundamental que a condução de atividades agropecuárias mais sustentáveis atenda não somente ao cumprimento da legislação brasileira, mas também traga os atributos de uma atividade diferenciada que promova o melhor aproveitamento de áreas abertas associadas a adoção de medidas de conservacionistas de manejo do solo e da água, utilização de insumos biológicos, além da promoção da preservação de excedentes de vegetação nativa e restauração de áreas degradadas, essências para redução das emissões de GEE (gases de efeito estufa) e condução de uma agropecuária de baixa emissão de carbono, atendendo também a expectativa do mercado consumidor mais exigente, e colaborando com a condução de estratégias de conservação para a região. Assim, de acordo com a CNA (2023) a difusão da gestão das propriedades rurais no conceito de agricultura inteligente (*smart farming*) com a adoção de diferentes práticas tem agregado no melhor desempenho das áreas rurais, e de maneira complementar, juntas colaboram para mitigar os impactos e promover o aumento da produtividade, a diminuição dos custos pela redução dos insumos, a redução da utilização de fertilizantes e defensivos, colaborando com a rastreabilidade e segurança nos processos, os quais impactam diretamente no desempenho e rentabilidade de diferentes áreas.

De acordo com o relatório da OECD-FAO (2023), as soluções de mitigação e adaptação dos sistemas de produção agrícola abrangem a adoção em larga escala de processos e de tecnologias de produção inteligentes e neutras em carbono; e de maneira, adicional diferentes estudos têm demonstrado a importância de aumentar a produção em áreas abertas e consolidadas, diminuído a pressão sobre a abertura de novas áreas a fim de evitar novas conversões e desmatamentos. Contudo, o sucesso de ações voltadas a conservação, preservação e restauração de áreas no Cerrado, está diretamente ligado a articulação e o envolvimento de diferentes setores e governos, mas principalmente dos produtores rurais e das instituições representativas do setor, uma vez que a legislação brasileira permite a supressão de vegetação nativa nos imóveis rurais em até 80%, através da autorização de supressão de vegetação (ASV), respeitando os percentuais previstos de Reserva Legal (RL) e Áreas de Preservação Permanente (APP), conforme especificidades trazidas pela legislação florestal.

A definição de estratégias para ampliar as áreas preservadas no Cerrado, é essencial para garantir a manutenção não somente da biodiversidade encontrada nestas fisionomias, mas também de todos os recursos naturais a estas associados, incluído os recursos hídricos, considerando o longo processo de formação e a especiação das espécies que contribuiu para a *status* atual de conservação. Para isto, é importante otimizar o uso de áreas abertas, através da adoção de boas práticas, ampliar a produtividade, reduzir o desmatamento e a conversão de vegetação nativa e implementar os diferentes instrumentos trazidos pelo Código Florestal, entre estes os incentivos econômicos, fundamentais para aumentar a valorização dos ativos ambientais encontrados em áreas rurais no Brasil.

1.6 Considerações finais

A origem das Savanas no Brasil identificadas como Cerrado, de uma maneira geral, está relacionada a evidências florísticas e paleontológicas, registros de carvão vegetal, abordagens filogenéticas, incluído também a influência conjunta de fatores climáticos, edáficos e a ocorrência do fogo.

Considerando a sua localização, origem, período de formação e biodiversidade, é fundamental a condução de políticas públicas efetivas, que incentivem a preservação *lato sensu* e a conservação da vegetação nativa, associadas a medidas mitigadoras de impactos ambientais a exemplo da restauração de grandes áreas e da preservação de vegetação nativa.

As áreas de Cerrado exercem um papel estratégico para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais, colaborando na regulação do clima, estabilidade do solo, manutenção da biodiversidade e dos recursos hídricos, sendo reconhecida internacionalmente pela sua importância por diferentes aspectos e características.

Considerado a sua importância, relatada por diferentes autores sobre diversos aspectos, o momento é oportuno para se pensar o Cerrado de maneira integrada, ponderando as oportunidades trazidas pela legislação e as exigências do mercado para direcionar a expansão agropecuária, o uso e ocupação do solo mais eficiente, responsável e sustentável.

O cumprimento legal, associado aos compromissos nacionais e internacionais para redução do desmatamento em diferentes cadeias de suprimentos, têm um papel importante e potencial de contribuir com os esforços públicos no controle e diminuição do desmatamento e conversão da vegetação nativa.

É imprescindível e urgente a definição de estratégias claras para valorização de ativos ambientais em imóveis rurais para garantir a manutenção do Cerrado e de todos os recursos naturais associados.

O fomento a condução de pesquisas e estudos interligados que atenda não somente a ampliação do conhecimento sobre o Cerrado sobre diferentes aspectos, mas também descrevam suas potencialidades, diversidade, fragilidades e importância, trarão impactos positivos para o mercado, para o meio ambiente, mas principalmente para sociedade.

Este capítulo procura demonstrar que o Cerrado deve ser entendido e pensado de maneira integrada, considerando a sua biodiversidade mas também o *status* atual de ocupação, as áreas produtivas, as áreas conservadas, as áreas preservadas, as áreas em Unidades de Conservação e às áreas passíveis de restauração, uma vez que todos estes aspectos estão relacionados com a aplicação e cumprimento da legislação ambiental e de recursos hídricos, os quais são essenciais para gestão e a manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais.

Referências

AB'SABER, A. N. Contribuição a geomorfologia dos cerrados. *In*: FERRI, M. G. (Ed.). **Simpósio sobre o cerrado**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 117-124 p., 1963.

-
- AB'SABER, A. N. A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras. In Ferri, M. G. (Coord) **III Simpósio do cerrado**. Editora Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 3:1-14, 1971.
- AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. **Paleoclimas** 3:1-18, 1977.
- AB'SABER, A. N. O domínio dos cerrados: introdução ao conhecimento. **Revista do Serviço Público, Biblioteca(s)**: Embrapa Pantanal, 111:41-55, 1983.
- ALVIM, P. T. Teorias sobre a formação dos campos cerrados. **Anais ... Congr. Panam. Agron.**: 274-280. Piracicaba. 1954.
- AQUINO, F. G.; PINTO, J. R. R.; RIBEIRO, J. F. **Evolução histórica do conceito de Savana e sua aplicação**. 2009. Disponível em: <http://www.comciencia.br/comciencia/?section=8&edicao=42&id=505>. Acesso em: 02 ago. 2023.
- BARREDA, V. D.; PALAZZESI, L. Patagonian vegetation turnovers during the Paleogene–Early Neogene: origin of arid-adapted floras. **The Botanical Review**, 73: 31– 50, 2007.
- BATALHA, M. A. 1997. Análise da vegetação da ARIE cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Tese de Doutorado**. Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. 184p. Disponível em: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-01082001.../Batalha.pdf. Acesso em: 20 dez. de 2023.
- BATALHA, M. A.; ARAGAKI, S.; MANTOVANI, W. Variações fenológicas das espécies do cerrado em Emas (Pirassununga, SP). **Acta Botanica Brasílica**, 11: 61- 78, 1997.
- BATALHA, M. A.; MANTOVANI, W. Reproductive Phenological Patterns of Cerrado Plant Species at the Pe-de-Gigante Reserve (Santa Rita do Passa Quatro/SP, Brasil): A Comparison between the Herbaceous and Woody Floras. **Revista Brasileira de Biologia**, 60: 129-145, 2000.
- BATALHA, M. A.; MARTINS, F. R. Reproductive phenology of the cerrado plant community in Emas National Park (central Brazil). **Australian Journal of Botany**, 52:149-161, 2004.
- BATALHA, M. A. **O cerrado não é um bioma**. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bn/a/qkL5MqgNQmJFqcb873df7D/>. Acesso em: 20 nov. 2023.
- BAYON, G. *et al.* Intensifying Weathering and Land Use in Iron Age Central Africa. **Science**, 335: 1219-1222, 2012.
- BEARD, J. S. The savanna vegetation of Northern Tropical America. Ecological Monographs. Washington, DC: **Ecological Society of America – ESA** 23: 149-215, 1953.
- BEHLING, I. Late Quaternary vegetation and climatic changes in Brazil. **Revista Palaeobot. Palynol**, 99: 143-156, 1998.
- BEHLING, I.; HOOGHMESTRA H. Neotropical savanna environments in space and time: Late Quaternary interhemispheric comparison. In: **Interhemispheric climate linkages**. MARKGRAF, V. (Ed). Academic Press, New York. 307-323p., 2001.

-
- BORGHETTI, F. *et al.* Fitogeografia das savanas sul-americanas. **Heringeriana**, 1-55, 17: e918014, 2023.
- BOLFEEA, É. L. *et al.* **Tendências, desafios e oportunidades da Agricultura Digital no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230038/1/AP-Tendencias-desafios-oportunidades-2021.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- BOURLIÈRE, F.; HADLEY, M. Present-day savannas: an overview. *In: Ecosystems of the world – tropical savannas* (D.W. Goodall, ed.). Elsevier, Amsterdam, 1-17p., 1983.
- BAYON, G. *et al.* Intensifying weathering and land use in Iron Age Central Africa. **Science** 335: 1219–1222, 2012.
- BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 2006. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 02 ago.2023.
- BRASIL. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166/67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 02 ago. 2023.
- BUCCI, S. J. *et al.* Mechanisms contributing to seasonal homeostasis of minimum leaf water potential and predawn disequilibrium between soil and plants in Neotropical savanna trees. **Trees**, 19:296-304, 2005.
- CAMPANELLA, M. V.; BERTILLER, M. B. Plant phenology, leaf traits and leaf litterfall of contrasting life forms in the arid Patagonian Monte, Argentina. **Journal of Vegetation Science**, v. 19, n. 1, p. 75-85, 2008.
- CNA – Confederação Nacional da Agricultura. **Sumário Executivo**. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023–2032. Disponível em: <file:///Users/alessandrachaves/Downloads/Sumario-Executivo-Perspectivas-Agricolas-edicao-2023.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- COLE, M. M. Cerrado, Caatinga and Pantanal: The distribution and origin of the savanna vegetation of Brazil. **The Geographical Journal**, 126: 168-170, 1960.
- COLE, M. M. **The savannas**. Biogeography and geobotany. Academic Press, Harcourt Brace Javanovich Publishers, Publishers. London, UK. 1986.
- COLLINSON, A. S. Introduction to World Vegetation. London Unwin Hyman. 1988.
- COLINVAUX, P. A. **The ice-age Amazon and the problem of diversity**. In: NWO/Huygenslezing 7-30p. The Hague: Netherlands Organization for Scientific Research. 1997.
- COLINVAUX, P. A. *et al.* A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in glacial times. **Science**, 274: 85-87, 1996.
- COTRIM, F. Estratégias de adaptação e o impacto do fogo em áreas de savanas. *In: Boas Práticas – Aiba Rural*, nº 13. 92 p., 2019.

-
- COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: J. G. GOLDAMMER (ed.) **Fire in the tropical biota – ecosystem processes and global challenges**. Berlin, Springer-Verlag, 81-105p. 1990.
- CRUZ JR, F. W. *et al.* Isolation-drive changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. **Nature**, 434: 63-65, 2005.
- EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Review**. 38:201-341, 1972.
- EITEN, G. Brazilian “Savannas”. In: HUNTLEY, B.J., WALKER, B.H. (eds). *Ecology of Tropical Savannas*. Ecological Studies, vol 42. Springer, Berlin, **Heidelberg**. 1982.
Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0_3. Acesso em: 02 ago. 2023
- EITEN, G. **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas** (2ed)., Chapter Vegetação do Cerrado. Brasília (DF). 17-73p., 1994.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **MATOPIBA**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-matopiba/sobre-o-tema#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20agropecu%C3%A1ria%20do%20Matopiba,do%20total%20produzido%20no%20Brasil>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções** / Édson Luis Bolfe, Edson Eyji Sano, Silvia Kanadani Campos, editores técnicos. – Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1121716/1/LVDINAMICAAGRICO LACERRADO2020.pdf>. Acesso em: 20 mar.2024.
- FELFILI, J. M.; SILVA JÚNIOR., M. C. A. Comparative study of cerrado (sensu stricto) vegetation in Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, New York, v. 9, p. 277-289, 1993.
- FELFILI, J. M. *et al.* Estudo fenológico de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville no cerrado *sensu stricto* da fazenda Água Limpa no Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, 22:83- 90, 1999.
- FELFILI, J. M.; SILVA-JÚNIOR, M. C. **Biogeografia do Bioma Cerrado: Estudo Fisionômico da Chapada do Espigão Mestre do São Francisco**. UNB, Departamento de Engenharia Florestal. Brasília, DF. 152p. 2001.
- FELFILLI, J. M.; REZENDE A. V.; SILVA JÚNIOR, M. C. **Biogeografia do bioma Cerrado: vegetação e solos da Chapada dos Veadeiros**. Brasília. Editora Universidade de Brasília/Finatec, 256p. 2007.
- FERNANDES, A. 2000. **Fitogeografia brasileira**. Fortaleza, Multigraf, 340p.
- FERNANDES-BULHÃO, C.; FIGUEIREDO P. S. Fenologia das leguminosas arbóreas em uma área de cerrado marginal no nordeste do Maranhão. **Revista Brasileira Botânica**, 25:361-369, 2002.
- FERRI, M. G. Ecologia dos Cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado: Bases para utilização agropecuária. **Anais...** Itatiaia, São Paulo, Ed. Universidade de São Paulo 15- 36 (Reconquista do Brasil 38, 1977).

-
- FILGUEIRAS, T. S. Herbaceous plant communities. *In*: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, J. R. (eds.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. Columbia University Press, New York, 121-139p., 2002.
- FRANCO, A. C. Herbaceous plant communities. *In*: OLIVEIRA, P. S.; MARQUES, R. J. **The Cerrado of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press. 178-197p., 2002.
- FRANCO, A. C. *et al.* Leaf functional traits of Neotropical savanna trees in relation to seasonal water deficit. **Trees structure and Function**, 19:326-335, 2005.
- FURLEY, P. A.; NEWBY, W. W. **Geography of the biosphere: an introduction to the nature, distribution and evolution of the world's life zones**. London: Butterworths, 413p., 1983.
- FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology & Biogeography**, 8:223- 241, 1999.
- GOTTSBERGER, G.; MORAWETZ, W. Floristic and phytogeographic analysis of the savannas of Humaitá (Amazonas). **Flora**, 178:41-71, 1986.
- GOODLAND, R. A physiognomic analyses of the “cerrado” vegetation of the central Brazil. **Journal of Ecology**, 59:411-419, 1971(a).
- GOODLAND, R. Oligotrofismo e alumínio no cerrado. *In*: FERRI, M. G. (coord.) **III Simpósio sobre o Cerrado**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 44-50p, 1971 (b).
- GOODLAND, R.; POLLARD, R. The Brazilian cerrado vegetation: a fertility gradient. **Journal of Ecology**, 61: 219-224, 1973.
- GOODLAND, R.; FERRI, M. G. **Ecologia do Cerrado**. (Reconquista do Brasil, 52) 193p. 1979.
- GRACE, J. *et al.* Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography** (J. Biogeogr.), 33:387–400, 2006.
- HAQ, B. U.; HARDENBOL, J.; VAIL, P. R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. **Science**, 235:1156–1167, 1987.
- HARIDASAN, M. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. **Plant and Soil**, 65:265-273, 1982.
- HARIDASAN, M. Nutrição Mineral de Plantas Nativas do Cerrado. Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**, 12:54- 64, 2000.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas e de vegetação**. Rio de Janeiro. 2004.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento de Informações temáticas de natureza geográfica, de recursos naturais e socioeconômicos**. 2007.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2ª Edição revisada e ampliada. Manuais Técnicos em Geociências. São Paulo. IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências**. 271p. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomás**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomás.html>. Acesso em: 18 mar. 2024.

LEDRU, M. P. Late Quaternary environmental and climatic changes in central Brazil, **Quaternary Research**, v. 39, p. 90-98, 1993.

LEDRU, M. P. *et al.* The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. **Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol Journal**, 123: 239-257, 1996.

LEDRU, M. P. "3. Late Quaternary History and Evolution of the Cerrados as Revealed by Palynological Records". **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**, edited by Paulo S. Oliveira and Robert J. Marquis, New York Chichester, West Sussex: Columbia University Press, 2002, pp. 33-50. Disponível em: <https://doi.org/10.7312/oliv12042-002>. Acesso em 27 dez. 2023.

LEDRU, M. P. Late quaternary history and evolution of the cerrados. *In*: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press. 33-50p., 2000.

LENZA, E.; KLINK, C. A. Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF. **Revista Brasileira de Botânica**, 29: 627-638, 2006.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Análise da situação dos Recursos Hídricos do Cerrado com base na importância econômica e socioambiental de suas águas. *In*: **Anais do IX Simpósio Nacional do Cerrado e II Simpósio Internacional de Savanas Tropicais. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Embrapa-CPAC, Brasília, DF, pp. 1-6, 2007.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Recursos hídricos do Bioma Cerrado: importância e conservação. *In*: SANO, S. M., ALMEIDA S. P.; RIBEIRO J. F. (Ed.) **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa, Brasília, pp. 91-106, 2008.

LINDOSO, G. S. Cerrado *sensu stricto* sobre Neossolo Quartzarênico: Fitogeografia e Conservação. **Dissertação de Mestrado em Ecologia**. UNB – Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Ecologia. 186p., 2008.

LOCK, J. M. The seasonally dry vegetation of Africa: parallels and comparisons with the Neotropics. *In*: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. (Eds). **Neotropical Savanas and dry forests: Plant diversity, biogeography and conservation**. Boca Rotan; CRC Press. 449-467p., 2006.

MEDINA, E.; SILVA, J. F. Savana of northern South America: a steady state regulated by water-fire interactions on a background of low nutrient availability. **Journal of Biogeography**, 17:403-413,1990.

MÉIO, B. B. *et al.* Influência da flora das florestas Amazônica e Atlântica na vegetação do cerrado *sensu stricto*. **Revista Brasileira de Botânica**, vol. 26, no. 4, p. 437-444, 2003.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MIRANDA, A. C. The fire 46core. Pp. 51-68. *In*: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds.). **Cerrados of Brazil**. New York, Columbia University Press. 2002.

MISTRY, J. Savanas. **Progree in Physical Geography** 24:601-608, 2000.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* **Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial 47coregions**. Conservation International, Mexico, 392 pp. 2004.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. *In*: ZACHOS, F. E.; HABEL, J.C. (Eds.) **Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas**. Springer, **Heidelberg**, 3-22, 2011.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. **Conservation Biology**, 12: 516-520, 1998.

MMA – Ministério Do Meio Ambiente. **Convenção sobre a Diversidade Biológica**. 2000. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/textoconvenoportugus.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2023.

MOREIRA, A. G. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. **J. Biogeogr.**, 27:1021-1029, 2000.

MANTOVANI, W.; MARTINS, F. R. Variações fenológicas das espécies do cerrado da reserva biológica de Mogi Guaçu, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, 11:101-12, 1988.

MUNHOZ, C. B. R.; FELFILI, J. M. Florstic of the herbaceous and subshrub layer of a moist grassland in the Cerrado Biosphere Reserve (Alto Paraíso de Goiás), Brasil **Endinburgh Journal of Botany**, 63:343 – 354, 2006. Disponível em: DOI:10.1017/S0960428606000539

OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds.). **Cerrados of Brazil**. New York, Columbia University Press. 2002.

OLIVEIRA, P. E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. *In*: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. EMBRAPA – Cerrados, Planaltina, P. 169-188. 2008.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. 2009. Classificação das fitofisionomias da América do Sul Cisandina Tropical e subtropical: proposta de um novo sistema – prático e flexível – ou uma injeção a mais aos caos?. **Rodriguésia**, 60: 237-258.

OLSON, D. M. *et al.* Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. **Bioscience**, 51: 933–938. 2001. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/51/11/933/227116>. Acesso em: 27 dez. 2023.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT; FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS **Agricultural Outlook 2023–2032**; OECD Publishing: Paris, France, 2023.

PINHEIRO, M. H. O.; MONTEIRO, R. Contribution to the discussions on the origino of the cerrado biome: Brazilian Savana. **Brazilian Journal of Biology**, 1:95-102, 2010.

PINHEIRO, M. H. O. Formações savânicas mundiais: uma breve descrição fitogeográfica. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, 1: 306-313, 2010.

-
- PINTO, M. N. (org.). **Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas**. Editora Universidade de Brasília - UNB, Brasília, 657p, 1990.
- POTTER, P. E.; SZATMARI, P. Global Miocene tectonics and the modernworld. **Earth-Science Reviews**, 96:279–295, 2009.
- PRANCE, G. T. **Islands in Amazonia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 351:823-833, 1996.
- RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, 80:223-230, 1997.
- RATTER, J. A; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian Cerrado vegetation III. Comparison of the wood vegetation of 376 areas. **Edinburgh Journal of Botany**, 60: 57-109, 2003.
- RAVEN, P. H; AXELROD, D. I. Angiosperm biogeography and past continental movements. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, 61:539-673, 1974.
- REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.) **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Brasília, 107-149 p., 2008.
- REIS, A. T. C. C. 2014. Comparação florística e diversidade das áreas core de savanas “cerrado” e disjunções do leste da Bahia, Brasil. 266 f: il. **Tese de Doutorado** – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Botânica, 2014.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados - CPAC, 89-166p., 1998.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M., ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**, Planaltina, 152-212, 2008.
- RIDLEY, M. **Evolução**. Ed. Artmed, Porto Alegre. 2006.
- RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil**. v. 2. São Paulo. Editora HUCITEC, Editora da Universidade de São Paulo - EDUSP, São Paulo. 374p., 1979.
- RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil: Aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos**. Rio de Janeiro. Âmbito Cultural Edições Ltda. 747p., 1997.
- ROSSETTI, D. F.; ROCCAII, R. R.; TATUMIII, S. H. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.* Belém, v. 8, n. 1, p. 11-25, 2013. Disponível em: [http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv8n1_2013/evolucao\(rossetti\).pdf](http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv8n1_2013/evolucao(rossetti).pdf). Acesso em: 20 dez. 2023.
- RULL, V. Speciation timing and Neotropical biodiversity: the Tertiary-Quaternary debate in the light of molecular phylogenetic evidence. **Molecular Ecology**, 17:2722- 2729, 2008.
- SANKARAN, M. *et al.* Determinants of woody cover in African savannas. **Nature**, v. 438, n. 8, p. 846-849, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/7428894_Determinants_of_woody_cover_in_African_Savannas. Acesso em: 27 dez. 2023.

-
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. *et al.* A dry climatic event during the late Quaternary of tropical Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 99:115-129, 1998.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. Alguns aspectos sobre a Paleoecologia dos Cerrados. *In*: SCARIOT, A. *et al.* (Org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2005.
- SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados - CPAC, 151-212p, 2008.
- SARMIENTO G. The savannas of tropical America. *In*: Goodall D.W. (Ed), **Ecosystems of the world: tropical savannas**. Elsevier, Amsterdam, pp. 245-288, 1983.
- SARMIENTO G. **The ecology of Neotropical savannas**. Harvard University, Cambridge. 1984.
- SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (Org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. 2005.
- SCHEEL-YBERT, R. *et al.* Holocene palaeoenvironmental evolution in the São Paulo State (Brazil), based on anthracology and soil $\delta^{13}C$ analysis. **The Holocene**, 13:73–81, 2003.
- SOLBRIG, O. T. The diversity of the savanna ecosystem. *In*: SOLBRIG, O. T.; MEDINA, E.; SILVA, J. F. (Eds.). **Biodiversity and savanna ecosystem processes: a global perspective**. Berlin: Springer-Verlag, 1-27 p., 1996.
- SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do Bioma Cerrado. *In*: SANO, S. M., ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Brasília, 61-88 p., 2008.
- SUGUIO, K.; BIDEGAIN, J. C.; MOMER, N. A. Dados preliminares sobre as idades paleomagnéticas do Grupo Barreiras e da Formação São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, 16:171–175, 1986.
- VELOSO, H. P.; RANGEL, A. L. R. F.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 124 p., 1991.
- WALKER, B. H. (Ed.). **Determinants of tropical savannas**. Paris: IUBS. 156 p., 1987.
- WALTER, B. M. T. Fisionomias do bioma cerrado: síntese terminológica e relações florísticas. **Tese de Doutorado**. Departamento de Ecologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília – UnB, Brasília – DF, 2006.
- WALTER, B. M. T.; CARVALHO, A. M.; RIBEIRO, J. F. O conceito de savana e de seu componente Cerrado. *In*: SANO, S. M., ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Brasília, 19- 45 p., 2008.

CAPÍTULO 2

DIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO DA FLORA DO CERRADO BRASILEIRO

Jéssica Cauana de Oliveira Santana

Resumo

As paisagens naturais da flora do Cerrado brasileiro se manifestam através de diferentes fitofisionomias; representadas nas formações campestres, savânicas e florestais. Essa ampla variedade de paisagens resulta em uma notável riqueza de espécies, conferindo ao bioma a savana com a maior diversidade florística do mundo. No Brasil, o Cerrado compreende cerca de 13.000 espécies de plantas, dentre as quais aproximadamente 5.000 são endêmicas. No entanto, esses índices podem ser ainda maiores, considerando que o bioma apresenta uma plausível extensão territorial sem registros de amostras vegetais, inclusive dentro de áreas protegidas. Reforça-se, portanto, a relevância e o encorajamento das pesquisas botânicas; desde registros geográficos e fotográficos, coletas botânicas, herborização, identificação taxonômica e, por fim, a disponibilização e divulgação dessas informações; com o desígnio de endossar e expandir o alcance desse conhecimento. A intenção desse capítulo é proporcionar um olhar mais compreensivo à importância de se conhecer e proteger a vegetação do Cerrado, popularizando sua flora e contribuindo para bons resultados nas práticas de conservação, podendo ser utilizado como uma ferramenta de consulta que leve conhecimento para diferentes segmentos da sociedade. Contudo, é pertinente ressaltar que, diante da expressiva quantidade de espécies botânicas ocorrentes no Cerrado brasileiro; muitas com importância ecológica, econômica e social; seria inviável selecionar um número justo que as representassem nesse capítulo. Sendo assim, será apresentado aqui um apanhado geral da flora do Cerrado, com destaque para algumas espécies mais recorrentes, bem como, endêmicas e ameaçadas. Além disso, serão indicadas bases de dados confiáveis e de fácil acesso, que disponibilizam listas completas de espécies da flora do bioma, imagens e informações completas sobre o táxon, que podem ser consultadas pelo público em geral.

2.1 Introdução

O Cerrado é um bioma predominantemente brasileiro, sendo o único presente em todas as regiões do país (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul), com abrangência em 13 estados nacionais. Os maiores remanescentes do Cerrado ocorrem nos estados de Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais. O Distrito Federal está inteiramente inserido no bioma, bem como quase a totalidade do Tocantins (IBGE, 2019).

Além disso, o posicionamento geográfico do Cerrado, na região central do Brasil favorece o contato com uma variedade de outros biomas, incluindo a Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga, além do Chaco. Essa interação com diferentes tipos de vegetação contribuiu para o compartilhamento de diversas linhagens de espécies vegetais que integram a sua elevada riqueza florística (Simon *et al.*, 2009).

Nesse contexto, a flora do Cerrado compreende espécies que apresentam características adaptativas únicas; determinadas pelas condições climáticas, edáficas e aos efeitos do fogo (Scariot *et al.*, 2005). Algumas adaptações peculiares das plantas nativas do Cerrado, relativas ao clima e aos tipos de solo incluem, principalmente, raízes pivotantes longas, que alcançam grandes profundidades no solo em busca de água (Furquim *et al.*, 2018); acúmulo de alumínio por algumas espécies e resposta de crescimento eficiente em solos com baixas concentrações de nutrientes e pH ácido (Nascimento, 2011).

Em relação ao regime de fogo no Cerrado, esse pode ser considerado um desafio constante para as plantas perenes, porém necessário para a manutenção das savanas. De modo que, a flora do bioma apresenta um conjunto diversificado de características morfológicas adaptadas para tolerar as perturbações provocadas pelas queimadas naturais, incluindo sistema subterrâneo desenvolvido, associado à capacidade de rebrota; caule com súber espesso; estípulas que protegem os ápices dos brotos e, estratégias fenológicas e reprodutivas especializadas, muitas vezes com florações induzidas pelo fogo (Cochrane *et al.*, 2009; Simon; Pennington, 2012; Klink *et al.*, 2020).

O Cerrado também se sobressai quanto a abundância de recursos naturais, com destaque para a vasta extensão territorial ainda não ocupada, disponibilidade hídrica e paisagens naturais exuberantes (Scariot *et al.*, 2005). Devido a esses recursos, o bioma emerge como uma região estratégica, apresentando potencial significativo tanto para atividades econômicas, a exemplo da agricultura e do turismo; quanto para a preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Portanto, é fundamental conciliar o avanço do agronegócio e do segmento turístico com a conservação do bioma.

Todavia, é imprescindível que as áreas protegidas sejam ambientalmente eficazes e representativas (Gonçalves-Souza *et al.*, 2021). Contudo, nas etapas de planejamento de conservação ambiental, percebe-se que o maior desafio reside exatamente na delimitação de áreas que abriguem maior diversidade, raridade e endemismo de espécies possíveis (Enquist *et al.*, 2019). Nesse sentido, informações robustas sobre os dados de ocorrência de espécies no local são imperativas para a escolha assertiva dessas áreas, principalmente nas regiões mais ameaçadas do Cerrado.

Santana e Simon (2022) demonstraram que na recente fronteira agrícola do Cerrado, conhecida como MATOPIBA, localizada parcialmente nos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA), o conhecimento da flora local ainda é incipiente, onde cerca de 40% da área, praticamente, não tem registros de espécies. No entanto, apesar da significativa proporção de lacunas de amostragem, os resultados do estudo sugerem que a flora conhecida da região é consideravelmente rica, incluindo 54 espécies endêmicas e 38 ameaçadas, porém apenas 28% e 53% dessas espécies, respectivamente, ocorrem em áreas protegidas. Evidenciando a importância dessas informações no planejamento futuro de novas áreas de conservação na região.

Portanto, as pesquisas científicas contínuas e os esforços de coletas de dados, principalmente em áreas de lacunas, são essenciais para fornecer novas informações que possam contribuir para a garantia da integridade da flora do Cerrado frente aos desafios emergentes. Bem como, respaldar iniciativas que encorajem e que promovam o acesso da sociedade a esse conhecimento, para que todos possam ter compreensão da riqueza florística que pertence ao

Cerrado, esse bioma único, que possui extremo valor ambiental, econômico e social. E de que é possível a coexistência sustentável entre a natureza e as atividades humanas.

2.2 Contextualização

Tradicionalmente, os estudos sobre a biodiversidade e conservação de espécies se concentravam nas florestas tropicais, como a Amazônia, enquanto as demais vegetações não florestais eram pouco estudadas. Contudo, nas últimas duas décadas o conhecimento relacionado ao Cerrado, bioma caracterizado principalmente por savanas, mas que também possui formações campestres e florestais, aumentou exponencialmente, sobretudo quando são citadas as palavras – chave “biodiversidade” e “conservação” (Colli *et al.*, 2020).

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, superado em área apenas pela Amazônia, sua extensão territorial cobre mais de dois milhões de km² do Brasil (cerca de 23% do país) e partes da Bolívia e do Paraguai. No entanto, o Cerrado brasileiro já teve quase um milhão de km² da sua cobertura vegetal original suprimida, em decorrência do uso e ocupação do solo, principalmente, por atividades agrícolas e pecuária (MapBiomas, 2023).

Ainda assim, com apenas metade da cobertura vegetal nativa remanescente (MapBiomas, 2023), o bioma representa a savana com a maior diversidade florística do mundo e conta com elevado número de espécies endêmicas (cerca de 40%) (Flora e Funga do Brasil, 2023). Essa combinação de fatores, envolvendo áreas ameaçadas e elevado grau de endemismo, foi decisiva para classificar o Cerrado como um *hotspot* mundial prioritário para conservação (Myers *et al.*, 2000; Mittermeier *et al.*, 2011).

Apesar do reconhecimento de sua importância biológica, de todos os 35 *hotspots* mundiais de conservação, o Cerrado é o que possui a menor porcentagem de áreas naturais integralmente protegidas. Atualmente, apenas 8,21% de seu território está legalmente resguardado por Unidades de Conservação (UCs); desse total, 2,85% são de proteção integral e 5,36% de uso sustentável (MMA, 2023).

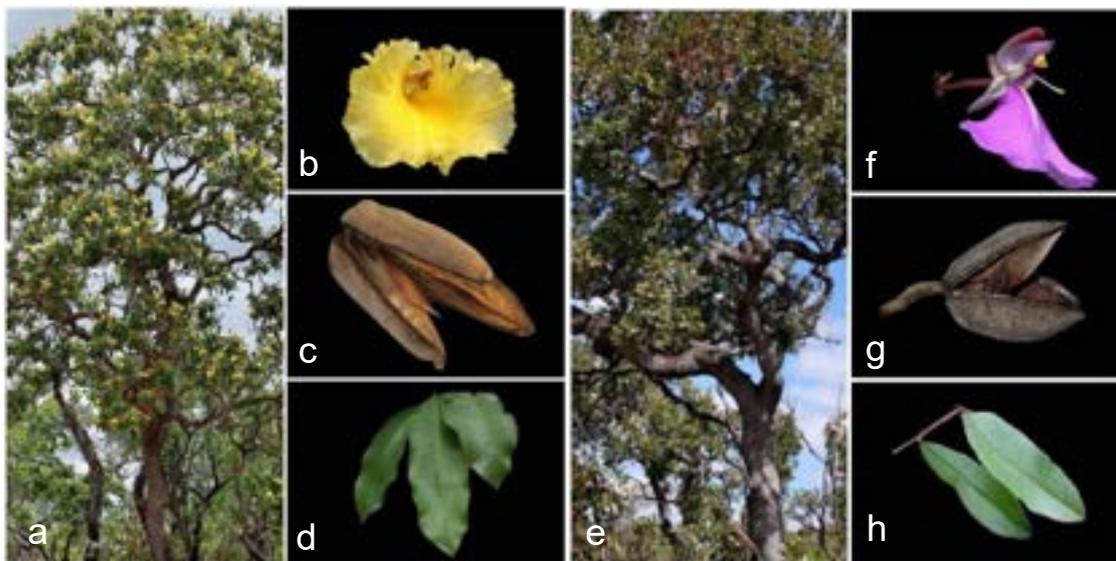
2.3 Diversidade da flora do Cerrado brasileiro

No Brasil, a flora do Cerrado compreende cerca de 13.000 espécies de plantas (incluindo briófitas, pteridófitas, angiospermas e gimnospermas), das quais, aproximadamente 5.000 são exclusivas do bioma (Flora e Funga do Brasil, 2023). As famílias botânicas mais representativas no bioma, em relação ao número de ocorrências, são: Fabaceae, Asteraceae, Melastomataceae, Poaceae, Rubiaceae, Malpighiaceae, Myrtaceae, Euphorbiaceae, Apocynaceae e Cyperaceae. Enquanto os gêneros mais prevalentes são *Chamaecrista*, *Mimosa*, *Byrsonima*, *Miconia*, *Myrcia*, *Eugenia*, *Paspalum*, *Microlicia*, *Banisteriopsis* e *Erythroxylum* (SpeciesLink, 2023).

Entre as espécies mais coletadas no Cerrado brasileiro destacam-se; *Qualea parviflora* (Vochysiaceae), *Xylopia aromatica* (Annonaceae), *Tapirira guianensis* (Anacardiaceae), *Byrsonima intermedia* (Malpighiaceae), *Myrcia guianensis* (Myrtaceae), *Qualea grandiflora* (Vochysiaceae), *Eugenia puniceifolia* (Myrtaceae), *Erythroxylum suberosum* (Erythroxylaceae), *Palicourea rigida* (Rubiaceae) e *Myrcia splendens* (Myrtaceae) (SpeciesLink, 2023).

Em relação à distribuição geográfica, *Qualea grandiflora* e *Qualea parviflora* (Figura 1) são as espécies mais amplamente distribuídas no Cerrado, conforme os resultados encontrados por Ratter e colaboradores (2003) nas áreas de amostragens realizadas ao longo do bioma, onde foram identificadas 38 espécies com ampla distribuição para o Brasil, designadas espécies oligárquicas (Bridgewater *et al.*, 2004).

Figura 1 - Árvore de *Qualea grandiflora* (a) com flor (b), fruto (c) e folhas (d)
Árvore de *Qualea parviflora* (e) com flor (f), fruto (g) e folhas (h)



Fonte: Fotos da Autora (2023).

A elevada riqueza de espécies da flora do Cerrado tem como um dos fatores determinantes o posicionamento geográfico do bioma, localizado na região central do Brasil. Essa localização favorece a interação com a Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal e Caatinga (IBGE, 2019), proporcionando o compartilhamento de espécies vegetais que são características de ambientes com condições climáticas regionais úmidas e secas.

Ao norte, noroeste e oeste do Brasil, o Cerrado interage com a Amazônia. Já em parte do leste, sul e sudeste com a Mata Atlântica. A ocorrência de espécies florestais dessas regiões úmidas pode ser observada ao longo das florestas ribeirinhas do bioma, como matas ciliares e matas de galeria (Méio *et al.*, 2003).

Aproximadamente 20% das espécies de plantas do Cerrado estão associadas a tipos de vegetação característicos de áreas úmidas (Mendonça *et al.*, 2008). Incluindo famílias botânicas em que todos os seus representantes ocorrem predominantemente ou exclusivamente nessas áreas, consideradas espécies indicadoras desses ambientes (Durigan *et al.*, 2022). Essa especificação resulta em elevados níveis de endemismo e espécies ameaçadas de extinção, como *Eriocaulon burchellii* (Eriocaulaceae), *Microlicia ordinata* (Melastomataceae), *Xyris goyazensis* (Xyridaceae), *Polygala bevilacqua* (Polygalaceae) e *Mesosetum alatum* (Poaceae) (Martinelli *et al.*, 2014).

Nas formações campestres, a exemplo do campo limpo úmido, é comum encontrar *Cyperus brasiliensis* (Cyperaceae), *Syngonanthus nitens* (Eriocaulaceae), *Bletia catenulata* (Orchidaceae), *Xyris jupicai* (Xyridaceae) e *Andropogon virgatus* (Poaceae). Já no campo sujo úmido, há registros de *Ilex brasiliensis* (Aquifoliaceae), *Casearia sylvestris* (Salicaceae), *Miconia albicans* (Melastomataceae), *Jacaranda caroba* (Bignoniaceae) e *Duguetia furfuracea* (Annonaceae). E no campo de murundus há prevalência de *Bowdichia virgilioides* (Fabaceae), *Cecropia pachystachya* (Urticaceae), *Curatella americana* (Dilleniaceae), *Lafoensia pacari* (Lythraceae) e *Vochysia divergens* (Vochysiaceae) (Durigan *et al.*, 2022).

Nas savanas, as veredas se destacam devido a presença de palmeiras, a exemplo de *Mauritia flexuosa* (Arecaceae) e alguns arbustos como *Macairea radula* (Melastomataceae), *Dendropanax cuneatus* (Araliaceae), *Calophyllum brasiliense* (Calophyllaceae) e *Byrsonima umbellata* (Malpighiaceae). E nas formações florestais de matas de galeria, as espécies arbóreas mais frequentes são *Calophyllum brasiliense* (Calophyllaceae), *Ferdinandusa speciosa* (Rubiaceae), *Guarea macrophylla* (Meliaceae), *Hedyosmum brasiliense* (Chloranthaceae) e *Richeria grandis* (Phyllanthaceae) (Durigan *et al.*, 2022).

Nos limites sul e sudoeste do país, o contato do Cerrado ocorre com o Pantanal. E pelo leste e nordeste, com as formações secas da Caatinga. Nesse caso, a influência de espécies de ambientes mais áridos pode ser observada nos fragmentos isolados de florestas estacionais (semidecíduais e decíduais), regionalmente denominadas matas secas (Werneck *et al.*, 2012).

As florestas estacionais do Cerrado, comumente, são caracterizadas pela ocorrência de espécies consideradas típicas, tais como *Commiphora leptophloeos* (amBursaceae), *Aspidosperma pyrifolium* (Apocynaceae), *Astronium urundeuva* (Anacardiaceae), *Schinopsis brasiliensis* (Anacardiaceae), *Machaerium scleroxylon* (Fabaceae) e *Sterculia striata* (Malvaceae) (Silva *et al.*, 2011). Essas espécies também ocorrem nos biomas Caatinga e Pantanal.

Em relação as espécies lenhosas do Cerrado, de modo geral, 15% dos táxons que apresentam ampla distribuição também ocorrem em dois, ou mais, biomas vizinhos. A Mata Atlântica possui o maior número de flora compartilhada com o Cerrado (44%), seguida pela Amazônia (15%), Caatinga (9%) e Pantanal (1%) (Françoso *et al.*, 2016). Já o padrão de riqueza de espécies do componente herbáceo / arbustivo, indicou que os níveis mais altos de riqueza estão nas regiões centrais do Cerrado (Amaral *et al.*, 2017).

Além dos aspectos taxonômicos de composição e distribuição da flora, é importante enfatizar que o Cerrado também apresenta uma miríade de espécies nativas com potencial econômico para diversos usos; incluindo espécies madeireiras, ornamentais, medicinais, utilizadas na indústria de cosmético, confecção de artesanatos, arborização urbana, recomposição ambiental, uso forrageiro, entre outros.

A variedade de espécies alimentícias, por exemplo, é expressiva no bioma, com destaque para alguns frutos que são regularmente consumidos pela população local e vendidos nos centros urbanos, a exemplo de *Caryocar brasiliense* (Pequi, Caryocaraceae), *Mauritia flexuosa* (Buriti, Arecaceae), *Hancornia speciosa* (Mangaba, Apocynaceae), *Eugenia dysenterica* (Cagaita, Myrtaceae), *Anacardium humile* (Cajuzinho - do - cerrado, Anacardiaceae) e *Annona crassiflora* (Araticum, Annonaceae).

Todo esse conhecimento, incluindo identificação botânica, distribuição geográfica, produção de mudas, formas de plantio e imagens pode ser consultado na plataforma *WebAmbiente* (<https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br>), um sistema de informação desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e pela Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável – Ministério do Meio Ambiente (MMA).

2.4 Espécies endêmicas e ameaçadas

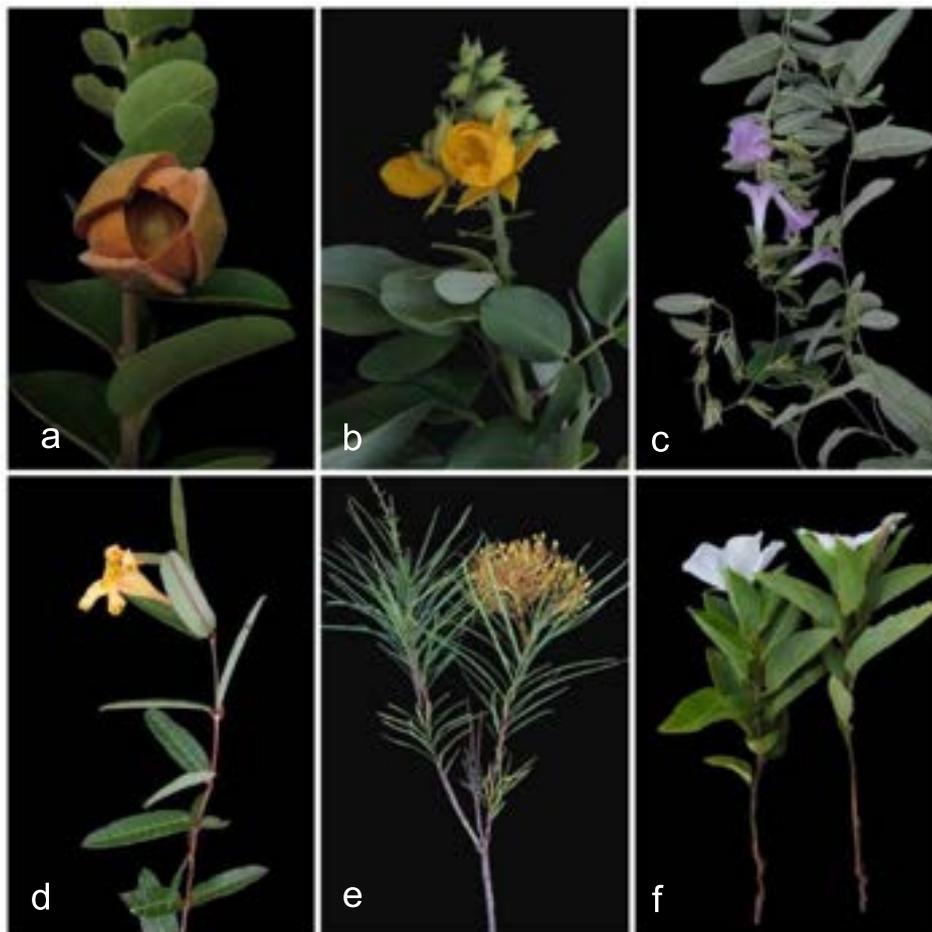
Estima-se que aproximadamente 40% da flora do Cerrado brasileiro é endêmica do bioma (Flora e Funga do Brasil, 2023), com maiores níveis de endemismo ocorrentes nas áreas de elevada altitude e nos campos rupestres (Simon; Proença, 2000; Echternacht *et al.*, 2011; Gastauer *et al.*, 2012). De modo que esses ambientes merecem atenção especial para a conservação.

Além disso, de acordo com o Livro Vermelho de Plantas Raras do Cerrado, pelo menos 366 espécies (apenas angiospermas) estão ameaçadas de extinção. Essas espécies foram avaliadas segundo os critérios da Lista Vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais das espécies ameaçadas, conhecida como IUCN e classificadas nas categorias de ameaça: Criticamente em perigo (CR), Em perigo (EN) e Vulnerável (VU) (IUCN, 2023). Ao total, 61 espécies foram categorizadas como (CR), 231 (EN) e 74 (VU) (Martinelli *et al.*, 2014).

A distribuição das plantas ameaçadas no Cerrado revelou que a maior concentração dessas espécies ocorre nas Regiões Centro-Oeste e Sudeste. Em todo Brasil, o estado de Minas Gerais sobressai com o maior número de espécies ameaçadas, seguido de Goiás e Bahia (Martinelli *et al.*, 2014).

Na região da fronteira agrícola do MATOPIBA foram encontradas 54 espécies endêmicas do Cerrado e 38 espécies ameaçadas (Figura 2), sendo sete classificadas como criticamente ameaçadas (CR), 17 como ameaçadas (EN) e 14 como vulneráveis (VU). Além disso, em apenas cinco anos (2015 - 2020) foram descobertas 27 espécies de plantas no MATOPIBA, das quais 23 são endêmicas da região (Santana; Simon, 2022). Nesse caso, a atenção deve ser ainda maior, uma vez que se trata de uma região impactada pela conversão de habitats naturais, podendo levar esses táxons a um risco iminente de extinção, inclusive de possíveis espécies ainda desconhecidas, por ser uma região ainda com extensas áreas de lacunas de registros de espécies.

Figura 2 - Espécies endêmicas e/ou ameaçadas encontradas na região do MATOPIBA: *Annona gardneri* (a), *Chamaecrista coradinii* (b), *Ipomoea maranhensis* (c), *Mandevilla abortiva* (d), *Ouratea acicularis* (e), *Turnera macrosperma* (f)



Fonte: Fotos de Marcelo Simon (2023).

Recentemente, o Ministério do Meio Ambiente – MMA instituiu uma lista de espécies nativas ameaçadas de extinção, como incentivo ao uso em métodos de recomposição de vegetação nativa em áreas degradadas ou alteradas (Portaria MMA nº 561, de 15 de dezembro de 2021). O documento apresenta 51 espécies avaliadas nas categorias: Criticamente em perigo (CR), Em perigo (EN) e Vulnerável (VU) para todos os biomas. A lista contempla 14 espécies do Cerrado, das quais nove são endêmicas. Ao total, duas espécies estão na categoria (CR), três (EN) e nove (VU) (Quadro 1):

Nesse mesmo contexto, relativo à recuperação de áreas degradadas ou alteradas, a Embrapa publicou um Guia de plantas do Cerrado para a recomposição da vegetação nativa, o qual conta com mais de 300 espécies vegetais das diferentes fitofisionomias do bioma, com informações importantes sobre como produzir mudas e sementes para seu cultivo (Ribeiro *et al.*, 2023).

Quadro 1 – Espécies nativas do Cerrado ameaçadas de extinção, sugeridas para recomposição de vegetação nativa em áreas degradadas ou alteradas do bioma

Espécie	Nome popular	Família	Hábito	Categoria de ameaça	Bioma	Distribuição geográfica das espécies - estados
<i>Acrocomia emensis</i>	Macaúba	Arecaceae	Subarbusto	VU	Cerrado	GO; MG; MT; PR; SP
<i>Anemopaegma arvense</i>	Alecrim-do-campo; caramuru; catuaba; marapuama	Bignoniaceae	Arbusto	EN	Mata Atlântica, Cerrado	GO; MG; MS; MT; PR; RJ; RO; SP; TO
<i>Apuleia leiocarpa</i>	Grápia; garapa	Fabaceae	Árvore	VU	Mata Atlântica, Cerrado, Amazônia	AC; AL; AM; BA; CE; ES; GO; MG; MS; MT; PA; PB; PE; PR; RJ; RS; SC; SE; SP; TO
<i>Bromelia macedoi</i>	Gravatá	Bromeliaceae	Herbácea	VU	Cerrado	DF; GO
<i>Butia capitata</i>	Butiá-azedo; butiá-vinagre; guariroba-do-campo	Arecaceae	Palmeira	VU	Cerrado	BA; GO; MG
<i>Butia purpurascens</i>	Butiá; palmeira-jataí; coqueiro-de-vassoura	Arecaceae	Palmeira	EN	Cerrado	GO; MG
<i>Cattleya walkeriana</i>	Catleia valkeriana	Orchidaceae	Epífita	VU	Mata Atlântica, Cerrado, Amazônia	DF; GO; MG; MS; MT; SP; TO
<i>Cedrela fissilis</i>	Acaiaçá; acaiaçatinga; acaju; cedro	Meliaceae	Árvore	VU	Cerrado, Pantanal, Amazônia, Pampa	AC; AL; AM; AP; BA; CE; DF; ES; GO; MA; MG; MS; MT; PA; PB; PE; PI; PR; RJ; RN; RO; RS; SC; SE; SP; TO
<i>Euterpe edulis</i>	Içara; palmito-doce; palmito-juçara	Arecaceae	Palmeira	VU	Mata Atlântica, Cerrado	AL; BA; DF; ES; MG; PB; PE; PR; RJ; RN; RS; SC; SE; SP
<i>Lavoisiera cordata</i>	Não consta	Melastomataceae	Arbusto	VU	Cerrado	MG

(Continua)

Continuação Quadro 1 - Espécies nativas do Cerrado ameaçadas de extinção, sugeridas para recomposição de vegetação nativa em áreas degradadas ou alteradas do bioma

Espécie	Nome popular	Família	Hábito	Categoria de ameaça	Bioma	Distribuição geográfica das espécies - estados
<i>Ocotea odorifera</i>	Canela-sassafrás; canela-cheirosa; louro-cheiroso	Lauraceae	Árvore	EN	Cerrado	BA; ES; MG; PA; PE; PR; RJ; RS; SC; SP
<i>Setaria parviflora</i>	Capim-rabo-de-raposa	Poaceae	Erva	CR	Cerrado	AC; AL; AM; AP; BA; DF; ES; GO; MA; MG; MS; MT; PA; PB; PI; PR; RJ; RN; RR; RS; SC; SE; SP; TO
<i>Xyris platystachya</i>	Sempre-viva	Xyridaceae	Erva	CR	Cerrado	MG; MT

Fonte: Adaptação da tabela publicada na Portaria MMA nº 561, de 15 de dezembro de 2021, do Ministério do Meio Ambiente.

2.5 Conservação da flora do Cerrado no Brasil

A variação regional na composição florística de espécies do Cerrado e as amplas transformações na paisagem que o bioma vem passando, devido ao uso e ocupação do solo, implicam a necessidade de políticas de conservação especificamente adaptadas com base no planejamento regional. Idealmente, os esforços e recursos de conservação devem ser concentrados em áreas que abriguem o maior número possível de espécies indicadoras, endêmicas e ameaçadas. Além disso, é importante contemplar todos os tipos de ambientes e fitofisionomias que ocorrem no bioma.

O Cerrado brasileiro contempla 542 Unidades de Conservação (UCs), de domínios público e privado, incluindo 241 federais, 205 estaduais e 96 municipais, cobrindo 8.62% do bioma. No entanto, subtraindo a sobreposição de áreas e considerando apenas a fração coberta por vegetação nativa, esse percentual reduz para 6,5%. Além disso, as Unidades de Conservação (UCs) podem ser de Uso Sustentável (US), que são mais permissivas para o uso dos recursos naturais, ou de Proteção Integral (PI), que é a categoria mais restritiva e eficaz na proteção da biodiversidade. Sendo assim, ao considerar as áreas que estão sob proteção integral, menos de 3% da cobertura vegetal do Cerrado está efetivamente protegida por UCs. Além das Unidades de Conservação, as áreas protegidas do Cerrado compreendem as Terras Indígenas e Quilombolas. E áreas de Reserva Legal (RL) (MMA, 2023).

A maioria das Áreas Protegidas (APs) do Cerrado brasileiro apresenta poucos estudos referentes à sua biodiversidade, o que indica uma lacuna no conhecimento da flora nesses locais. Além disso, as pesquisas científicas estão concentradas, em grande parte, nas APs maiores e mais antigas, enquanto as APs menores são negligenciadas (Gonçalves *et al.*, 2020).

Contudo, os estudos relativos à ocorrência e identificação de espécies vegetais no Brasil e no Cerrado tiveram um aumento significativo nas últimas décadas e muitos desses esforços se deram em resposta à Estratégia Global para a Conservação de Plantas (EGCP), adotada pelas Partes da Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB), onde o país se comprometeu a elaborar uma lista abrangente de todas as suas plantas, até 2010. Como resultado, foi publicado o *Catálogo de plantas e fungos do Brasil* com 40.989 registros de espécies, representando a estimativa mais precisa da diversidade vegetal no Brasil em um século (Forzza *et al.*, 2010). Esse trabalho confirmou estimativas anteriores de que o Brasil é o país com o maior número de espécies conhecidas de plantas vasculares do mundo e que o Cerrado possui a savana com maior riqueza florística.

Posteriormente, foi desenvolvido um segundo projeto, ainda mais visionário e inovador, intitulado *Flora do Brasil 2020*, que apresentou 46.975 registros de espécies nativas de plantas, algas e fungos para o Brasil, incluindo 19.669 espécies endêmicas do país, os dados estão disponibilizados em uma plataforma *online*, com informações sobre nomenclatura, distribuição geográfica, morfologia, chaves de identificação e fotografias. Atualmente o projeto é intitulado *Flora e Funga do Brasil* (<https://floradobrasil.jbrj.gov.br>).

As plataformas digitais de informações sobre a flora do Cerrado e do Brasil, citadas aqui; *Flora e Funga do Brasil* (JBRJ); *WebAmbiente* (Embrapa); *SpeciesLink* (CRIA); bem como, a variedade de artigos científicos, guias e livros publicados, são ferramentas confiáveis, completas e acessíveis para qualquer pessoa que manifeste interesse ou necessite desses dados. E esse livro será mais uma fonte de conhecimento sobre esse bioma inexorável.

2.6 Considerações finais

A elevada riqueza florística, com consideráveis taxas de endemismos, bem como os serviços ecossistêmicos, produção hídrica e estoque de carbono, tornam o Cerrado um bioma único e essencial dentro do contexto da biodiversidade mundial. Além disso, as adaptações das espécies às condições específicas do clima, do solo e aos efeitos do fogo, bem como, a diversificação da flora, representadas em paisagens de campos, savanas e florestas, levaram milhares de anos para serem moldadas e se estabelecerem. Toda essa dinâmica e complexidade biológica faz com que a flora do Cerrado seja alvo de estudos científicos discutidos e reconhecidos globalmente.

Ao compartilhar com o leitor o conhecimento adquirido durante anos de pesquisas e coletas botânicas no Cerrado, espera-se, com o conteúdo desse capítulo, contribuir para intensificar os estudos e as ações visando à conservação e restauração desse bioma tão precioso e ameaçado, com toda a sua peculiar biodiversidade. Sobretudo, espera-se também que essa obra desperte a atenção das pessoas para a riqueza extraordinária da flora admirável e resiliente que compõe o Cerrado e, assim, reconhecer o seu devido valor.

Referências

AMARAL, A. G. *et al.* Richness pattern and phytogeography of the Cerrado herb–shrub flora and implications for conservation. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, n. 4, p. 848-858, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 561, de 15 de dezembro de 2021. **Diário Oficial da União**, Nº 236, Seção 1, 18 de dezembro de 2021.

BRIDGEWATER, S.; RATTER, J. A.; FELIPE RIBEIRO, J. Biogeographic patterns, β -diversity and dominance in the cerrado biome of Brazil. **Biodiversity & Conservation**, v. 13, p. 2295-2317, 2004.

COCHRANE, M. A. **Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics**. Berlin: Springer, p. 25-62, 2009.

COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1465-1475, 2020.

CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. 2011. *Specieslink*. Disponível em: <http://www.splink.org.br/index>. Acesso em: dez. 2023.

DA SILVA PEREIRA, B. A.; VENTUROLI, F.; CARVALHO, F. A. Seasonal forests in the Brazilian savannah: an overview. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, 2011.

DURIGAN, G. *et al.* Cerrado wetlands: multiple ecosystems deserving legal protection as a unique and irreplaceable treasure. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 20, n. 3, p. 185-196, 2022.

ECHTERNACHT, L. *et al.* Areas of endemism in the Espinhaço range in Minas Gerais, Brazil. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 206, n. 9, p. 782-791, 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: dez. 2023.

ENQUIST, B. J. *et al.* The commonness of rarity: Global and future distribution of rarity across land plants. **Science advances**, v. 5, n. 11, p. eaaz0414, 2019.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso em: dez. 2023.

FORZZA, R. C. *et al.* **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, v. 1, 2010.

FRANÇOSO, R. D.; HAIDAR, R. F.; MACHADO, R. B. Tree species of South America central savanna: endemism, marginal areas and the relationship with other biomes. **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, p. 78-86, 2016.

FURQUIM, L. C. *et al.* Relação entre plantas nativas do cerrado e água. **Científica Multidisciplinary Journal**, v. 5, n. 2, p. 146-156, 2018.

GASTAUER, M.; MESSIAS, M. C. T. B.; MEIRA NETO, J. A. A. Floristic composition, species richness and diversity of Campo Rupestre vegetation from the Itacolomi State Park,

Minas Gerais, Brazil. **Environment and Natural Resources Research**, v. 2, p. 115-128, 2012.

GONÇALVES, T. V.; DE AMORIM GOMES, M. A.; NABOUT, J. C. The historical geography, bioclimatic, and informetric conditions of protected areas in the Brazilian Cerrado. **Journal for Nature Conservation**, v. 58, p. 125905, 2020.

GONÇALVES-SOUZA, D. *et al.* The role of protected areas in maintaining natural vegetation in Brazil. **Science Advances**, v. 7, n. 38, p. eabh2932, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

compatível com a escala 1: 250.000. Série Relatórios Metodológicos, 45, 2019.

IUCN - União Internacional para a Conservação da Natureza. 2023. **The IUCN Red List of Threatened Species**. Version 2023-1. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org>. Acesso em: dez. 2023.

KLINK, C. A. *et al.* The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the Cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1803, 2020.

MARTINELLI, G.; MESSINA, T.; SANTOS FILHO, L. Livro vermelho da flora do Brasil: plantas raras do Cerrado. In: **Livro vermelho da flora do Brasil: plantas raras do cerrado**. 2014. p. 319-319.

MÉIO, B. B. *et al.* Influência da flora das florestas Amazônica e Atlântica na vegetação do cerrado sensu stricto. **Brazilian Journal of Botany**, v. 26, p. 437-444, 2003.

MENDONÇA, R. C. *et al.* Flora vascular do bioma Cerrado: checklist com 12.356 espécies. **Cerrado: ecologia e flora**, v. 2, p. 423-1279, 2008.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In: **Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 3-22.

MMA - Ministério do Meio Ambiente.

CNUC. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: dez.2023.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NASCIMENTO, M. S. Functional ecology and allocation patterns of aluminum and nutrients in woody plants of the cerrado. 2011. 68 f. **Dissertação** (Mestrado em Botânica estrutural; Ecologia e Sistemática) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh journal of botany**, v. 60, n. 1, p. 57-109, 2003.

RIBEIRO, J. F. *et al.* **Guia de plantas do Cerrado para recomposição da vegetação nativa**. 2 ed., Brasília, DF: Embrapa, 2023.

SANTANA, J. C. de O.; SIMON, M. F. Plant diversity conservation in an agricultural frontier in the Brazilian Cerrado. **Biodiversity and Conservation**, v. 31, n. 2, p. 667-681, 2022.

SCARIOT, A.; SEVILHA, A. C. Biodiversidade, estrutura e conservação de florestas estacionais decíduais no Cerrado. In: SCARIOT, A. *et al.* (Orgs.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

SIMON, M. F. *et al.* Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 48, p. 20359-20364, 2009.

SIMON, M. F.; PENNINGTON, T. Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. **International Journal of Plant Sciences**, v. 173, n. 6, p. 711-723, 2012.

SIMON, M. F.; PROENÇA, C. Phylogeographic patterns of *Mimosa* (Mimosoideae, Leguminosae) in the Cerrado biome of Brazil: an indicator genus of high-altitude centers of endemism?. **Biological conservation**, v. 96, n. 3, p. 279-296, 2000.

WERNECK, F. P. *et al.* Stability in the Brazilian Cerrado: implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot. **Journal of Biogeography**, v. 39, n. 9, p. 1695-1706, 2012.

CAPÍTULO 3

FENOLOGIA DE PLANTAS NATIVAS DO CERRADO E ESTRATÉGIAS DE RESTAURAÇÃO

Valdelice Oliveira Lacerda
Ana Maria Mapeli

Resumo

A fenologia corresponde ao estudo da ocorrência e causas de eventos biológicos repetitivos (abscisão, rebrota, floração e frutificação) em relação às forças seletivas bióticas e abióticas, auxiliando na compreensão das estratégias de crescimento, regeneração e reprodução de plantas em diferentes condições ambientais, bem como na organização espacial e temporal e nas interações biológicas com outras espécies (competitividade, herbivoria, polinização e dispersão). No Cerrado, a incidência do fogo é um dos fatores que interfere nas fenofases, visto que as plantas apresentam estratégias para sobreviverem em tais condições, incluindo: suberização, brotação após o fogo, tegumento da semente espesso, folhas com características xeromórficas e acúmulo de nutrientes. Tais características precisam ser consideradas em projetos de restauração florestal, pois para a execução destes deve-se atentar a diferentes fatores como composição de espécies, ciclos de vida e adaptações fenológicas das plantas. Assim, a fenologia, as condições ambientais do Cerrado e os esforços de restauração estão interconectados em um intrincado equilíbrio que desempenha um papel fundamental na preservação e revitalização dos ecossistemas.

3.1 Introdução

O Cerrado é uma savana Neotropical que se caracteriza pela sazonalidade e riqueza da flora, as quais estão interligadas, visto que as espécies vegetais apresentam forte sazonalidade em relação à produção de flores e frutos, a fim de se adaptarem aos fatores edafoclimáticos e biológicos.

Neste contexto, a fenologia tem grande importância, pois é o estudo dos padrões temporais de eventos recorrentes no ciclo de vida de organismos, incluindo floração, frutificação, foliação, dormência e outros processos biológicos, que estão relacionados às influências ambientais sazonais, tais como mudanças climáticas, ciclos de luz, temperatura e disponibilidade de água (Schwartz, 2003).

Nesse cenário, as interações biológicas, incluindo herbivoria, polinização, dispersão e competição por recursos, desempenham um papel fundamental na compreensão dos processos ecológicos, sendo que os resultados indicam variações sazonais capazes de afetar a abundância e a diversidade das espécies em um determinado ambiente natural (Thompson, 2005).

A fenologia, as condições ambientais do Cerrado e os esforços de restauração estão interconectados, desempenhando um papel fundamental na recuperação de ecossistemas, visto

que estratégias de restauração bem-sucedidas devem levar em conta a sincronização das atividades fenológicas com as condições ambientais específicas.

Além disso, iniciativas de restauração podem se beneficiar da promoção de espécies nativas adaptadas às condições específicas do Cerrado, levando em consideração suas estratégias fenológicas naturais. Isso é particularmente relevante em cenários onde a degradação do solo e a perda de biodiversidade exigem intervenções restaurativas significativas.

É importante destacar que os diversos tipos de restauração florestal estão associados à fenologia das espécies a serem empregadas, a saber:

- Restauração passiva: envolve o retorno espontâneo de um ecossistema perturbado, após a remoção dos agentes de degradação, como gado, fogo e erosão, referindo-se à regeneração natural e, portanto, depende de boas características do solo e do banco de sementes e/ou rebrotas. Geralmente, está associada ao contexto de paisagem que favoreça a chegada de novos indivíduos, em virtude da proximidade com áreas naturais que atuem como fonte de dispersão de propágulo (Coutinho *et al.*, 2019);
- Restauração ativa: relaciona-se ao plantio de mudas ou sementes, sendo importante o emprego de espécies nativas, considerando as adaptações à radiação e tempo de crescimento (Colado, 2020);
- Restauração ecológica: tem a finalidade de restabelecer atributos de estrutura de um ecossistema, potencializando a conservação da biodiversidade, acarretando em bens e serviços ecossistêmicos (WWF, 2014; Sampaio *et al.*, 2021). Deste modo, precisa considerar aspectos de competição e simbiose entre espécies;
- Restauração de paisagens: pode ser entendida como o uso multifuncional da paisagem, a partir da compatibilização de diferentes usos da terra, como recuperação de pastagens e áreas agrícolas improdutivas, implantação de pastejo rotacionado, silvicultura, sistemas agroflorestais, restauração florestal, dentre outros, buscando a gestão e manejo integrados a fim de reverter danos ambientais e restabelecer processos ecológicos e gerar bens e serviços ecossistêmicos, como resiliência hídrica e regulação climática (Latawiec; Strassburg, 2024);
- Restauração de áreas úmidas: estas áreas, também conhecidas como *wetlands*, correspondem aos ambientes alagados temporários ou permanentes, ricos em biodiversidade, como brejos, várzeas, manguezais, etc. Esse tipo de restauração envolve técnicas específicas adaptadas às condições locais e vegetacionais, visto apresentarem uma série de adaptações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e de reprodução.

Independentemente do tipo de restauração, deve-se sempre atentar para as relações que ocorrem no ambiente, principalmente herbivoria, polinização, dispersão, disponibilidade de recursos, incidência de fogo, etc., as quais serão abordadas posteriormente.

A relação entre estes fatores determina diretamente o sucesso da restauração, pois a sincronia entre eles favorecerá a floração, frutificação, disseminação dos propágulos, coleta de sementes, bem como o rápido desenvolvimento mediante a quantidade adequada de recursos naturais, além da capacidade de rebrota que é uma característica marcante do Cerrado.

3.2 Contextualização

- *Fenologia: definição e classificações*

O termo fenologia é derivado da palavra grega *phainestai* que significa mostrar ou aparecer, sendo definida como o estudo temporal de eventos biológicos sazonais recorrentes e, portanto, um elemento importante em quase todas as linhas de pesquisa em ecologia e evolução animal e vegetal (Forrest; Miller-Rushing, 2010).

Diante disso, a fenologia pode ser entendida como as observações de fenômenos biológicos que ocorrem a partir de determinado ritmo em um certo período, incluindo aspectos vegetativos (abscisão foliar e brotação) e reprodutivos (floração e frutificação), conforme características da espécie e variando ao longo do ano (Longhi, 1984).

As variações fenológicas da flora estão intimamente ligadas aos fatores bióticos e abióticos, apresentando importância para a compreensão da dinâmica das comunidades florestais, constituindo também um indicador da resposta desses organismos às condições climáticas e edáficas de um ambiente (Fournier, 1969). Dessa forma, é válido considerar as variações dos padrões fenológicos dentro de populações, pois tais análises podem oferecer informações relevantes sobre a estratégia reprodutiva das espécies (Otárola; Rocca, 2014).

Diversas classificações foram criadas para agrupar as plantas segundo suas estratégias fenológicas. Para Sarmiento e Monasterio (1983), o critério principal para classificação fenológica se baseia na forma de assimilação de carbono, no crescimento e na floração. Nesse contexto, foram criados dois grupos:

- Grupo 1 – composto de indivíduos com assimilação sazonal de carbono, englobando plantas anuais, que passam o período seco em forma de órgãos subterrâneos ou sementes, e plantas perenes decíduas, cujo crescimento vegetativo ocorre preferencialmente na estação chuvosa;
- Grupo 2 – engloba plantas perenes sempre-verdes que mantêm sua assimilação de carbono durante todo ano, com crescimento vegetativo contínuo.

Independente do grupo, a floração pode ser classificada como precoce (ocorre no começo da estação chuvosa), retardada (ocorre no final da estação chuvosa) e tardia (de forma isolada durante a estação seca). Todavia, essa classificação não abrange todas as fenofases reprodutivas, sendo limitada para o entendimento sobre as adaptações reprodutivas de plantas tropicais.

Newstrom, Frankie e Baker (1994) propuseram uma classificação voltada para a fenologia reprodutiva de plantas tropicais, que abrange toda a diversidade e revela sequências temporais irregulares que são comuns neste ambiente, descrevendo padrões em cada nível de análise, desde a flor até o indivíduo, população ou comunidade, bem como a guilda. Assim são aplicados os quatro padrões básicos a seguir:

- Contínuo – quando a fenofase apresenta-se continuamente ou com interrupções breves;
- Subanual – quando a fenofase apresenta mais de um ciclo por ano;
- Anual – quando a fenofase apresenta um ciclo no período de um ano;

-
- Supra-anual – quando a fenofase apresenta um ciclo em um período superior a um ano ou quando os episódios da fenofase abordada ocorrem separados por intervalos superiores a um ano.

Outras classificações foram desenvolvidas para o estudo fenológico de plantas, algumas voltadas para vegetação de clima temperado (Croat, 1975; Tomlinson, 1980) e algumas voltadas para vegetação de clima tropical (Gentry, 1974; Reich; Borchert, 1982). De forma geral, os padrões fenológicos são considerados como o resultado do processo evolutivo das plantas como estratégia de otimização de uso dos recursos e melhor alocação de energia para as diferentes fases de vida, levando a um maior sucesso reprodutivo. Dessa forma, a fenologia não pode ser considerada apenas um ajustamento aleatório das plantas às mudanças ambientais (Sarmiento; Monasterio, 1983).

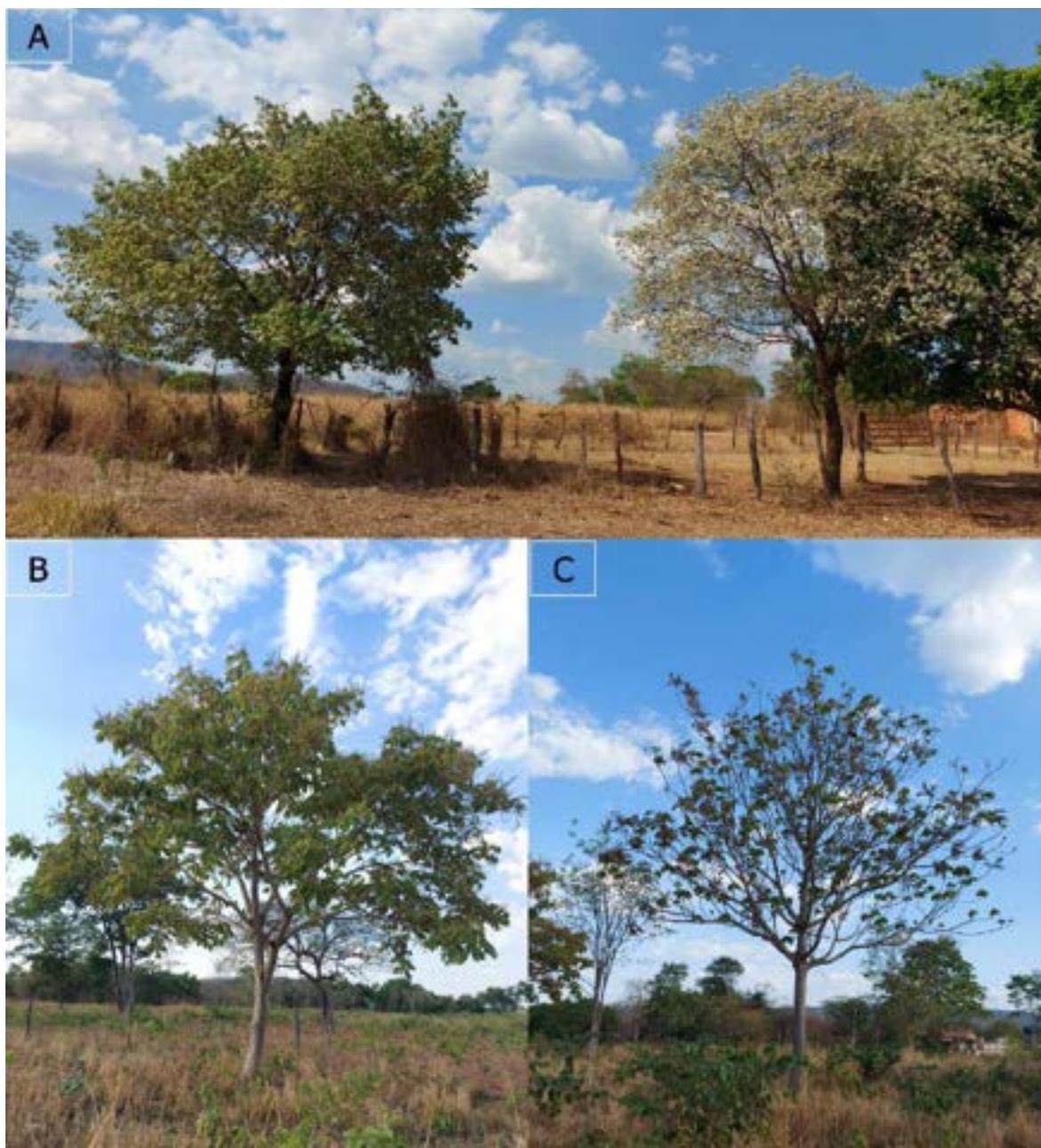
Neste contexto, é importante destacar que as fenofases das plantas desempenham um papel crucial na condução de campanhas de restauração ambiental, sendo essenciais para o planejamento e implementação eficaz dessas iniciativas. Isso ocorre porque a observação das fenofases permite identificar o momento ideal para o plantio das espécies, levando em consideração seu ciclo de vida e as condições climáticas locais. Esta situação maximiza as chances de adaptação e crescimento saudável das plantas, contribuindo para a eficácia da restauração. Além disso, o conhecimento das fenofases é crucial para a seleção adequada das espécies a serem utilizadas, considerando sua capacidade de suportar as condições ambientais presentes em cada período do ano.

Outro aspecto relevante é a relação das fenofases com a diversidade vegetal e a resiliência dos ecossistemas. Ao considerar a diversidade de espécies e seus diferentes períodos de atividade, é possível promover a restauração de áreas mais ricas e equilibradas, capazes de se adaptar a variações ambientais e resistir a possíveis perturbações. Isso é fundamental para a sustentabilidade e a longevidade dos projetos de restauração.

- *Dinâmica das fenofases em plantas do Cerrado*

Reconhecer os padrões fenológicos de plantas tropicais é um processo difícil, uma vez que estes são complexos e apresentam padrões irregulares, principalmente quando analisados em um curto espaço de tempo (Figura 1) (Bencke; Morellato, 2002a). Um dos fatores que dificultam essa análise é a variação no comportamento fenológico entre indivíduos de uma mesma população (Lenza; Klink, 2006), o que pode ser uma resposta às distintas condições climáticas e edáficas locais (Borchert, 1998; Bergamaschi, 2007).

Figura 1 - Indivíduos de *Aspidosperma* sp. (A) e *Sterculia* sp. (B e C) expostas às mesmas condições ambientais apresentando assincronia fenológica vegetativa



Fonte: Os Autores (2024).

Em regiões semiáridas e em savanas, os períodos sazonais secos e úmidos se alternam, fazendo com que a fenologia das plantas presentes nesses ambientes seja condicionada à disponibilidade hídrica. Outros fatores, como temperatura do ar e fotoperiodismo, também, são moduladores das fenofases vegetais (Bergamaschi, 2007). Entretanto, Lenza e Klink (2006) observaram que a restrição hídrica sazonal no Cerrado *sensu stricto* não impede a ocorrência dos eventos fenológicos para a grande maioria das espécies lenhosas dessa fitofisionomia,

indicando que as mesmas são capazes de manter a produção de folhas, flores e frutos durante o período seco. Em regiões de clima seco, como Cerrado e Caatinga, as estratégias fenológicas vegetativas das plantas lenhosas estão mais condicionadas ao clima, enquanto as reprodutivas são mais dependentes da disponibilidade de água no solo, durante a estação seca (Barbosa; Barbosa; Lima, 2003).

Devido à ampla variação climática que influencia as fenofases no Cerrado (temperatura, luminosidade, duração da seca, precipitação pluviométrica entre outros), não se pode generalizar, sem restrições, as informações sobre a periodicidade das fenofases observada em uma dada espécie presente em uma área para toda a região abrangida por esse bioma (Pilon; Udulutsch; Durigan, 2015). Associado a isso, estudos têm demonstrado que populações de uma mesma espécie submetidas às condições ambientais distintas podem apresentar variações significativas nos seus padrões fenológicos (Bulhão; Figueiredo, 2002; Santos; Ferreira, 2012; Lacerda; Mapeli, 2021).

Um grande número de espécies de plantas do Cerrado apresenta comportamento com diferentes níveis de deciduidade/caducifolia. A queda das folhas em plantas de Cerrado está intimamente relacionada à sazonalidade marcante de longos períodos com restrição hídrica (Pirani; Pedroni, 2009). Sob baixa disponibilidade hídrica, a perda foliar se mostra uma estratégia eficaz de evitação ao estresse hídrico, pois reduz a transpiração (Taiz *et al.*, 2017). Todavia, a deciduidade nas plantas impossibilita ocorrência da fotossíntese, uma vez que as folhas são os principais órgãos detentores da maquinaria fotossintética. Para contornar esse fator limitante imposto pela caducifolia, as plantas acumulam carboidratos em diferentes órgãos, como caules, raízes e outras estruturas especializadas (Ferraro *et al.*, 2022). Espécies que possuem essa estratégia apresentam maior capacidade de sobrevivência diante das mudanças ambientais e exposições às condições adversas.

Assim como o crescimento vegetativo, as fenofases reprodutivas também são influenciadas pelas condições ambientais e suas variações. Compreender a sincronia na floração dentro ou entre populações possui um importante papel na manutenção destas no ambiente, bem como os impactos das mudanças climáticas sobre essas populações e sobre o bioma Cerrado como todo (Bencke; Morellato, 2002b; Mendoza; Peres; Morellato, 2017; Meireles *et al.*, 2023). Além disso, o entendimento do comportamento fenológico contribui para a implantação de programas de restauração e recuperação de áreas degradadas, uma vez que disponibiliza informações sobre o período de floração e frutificação de espécies nativas, permitindo o planejamento para que a coleta de frutos e sementes ocorra no período adequado (Andreis *et al.*, 2005).

Nesse cenário, torna-se relevante as interações que ocorrem entre os seres vivos, que garantem a manutenção e equilíbrio da biodiversidade, como as interações planta-herbívoro, planta-polinizador ou planta-dispersor, as quais estão associadas ao aparecimento das fenofases vegetais. Diante disso, torna-se importante o conhecimento da relação da sincronia da floração com diversos fenômenos que ocorrem no Cerrado, com destaque para herbivoria, polinização, formas de dispersão, competição por recursos e variabilidade genética.

a) Relação da sincronia da floração com herbivoria

A herbivoria é uma interação ecológica que exerce uma provável pressão evolutiva em algumas espécies vegetais, interferindo na sobrevivência e reprodução, cujo efeito depende de vários fatores, incluindo espécie, estágio de desenvolvimento, intensidade e frequência do dano,

bem como de aspectos ambientais, podendo ocorrer no âmbito do indivíduo ou até da comunidade (Maschinski; Whitham, 1989).

Os herbívoros podem consumir qualquer tecido vegetal, sendo que o impacto no desenvolvimento da planta irá depender do tecido que é consumido. Durante a herbivoria, pode-se observar efeitos diretos e indiretos na floração, como atraso, redução no número e tamanho floral, decréscimo na quantidade e qualidade dos recursos disponibilizados aos polinizadores. Além disso, os danos na folha, principal órgão fotossintético, causa decréscimo na disponibilidade de carboidratos, os quais são essenciais para indução floral e formação dos frutos, interferindo na reprodução.

A fim de se defender, as plantas utilizam estratégias que podem ser divididas em química ou física. A primeira envolve a produção de metabólitos secundários, como látex, alcaloides, glicosídeos, taninos e lignina. A defesa física ocorre a partir de tricomas, espinhos e outras modificações morfológicas (Taiz *et al.*, 2017). Ainda, merecem destaque as defesas fenológicas, como o crescimento vegetativo ou florescimento em épocas desfavoráveis aos herbívoros.

No Cerrado, as plantas apresentam características de defesa importantes, como troncos e galhos com casca dura e espessa, folhagem coriácea e pouco palatável e presença de compostos repelentes, silicosos e com taninos (Camargo, 2002), além de apresentar condições edafoclimáticas que favorecem a produção de metabólitos secundários, que atuam na defesa e reprodução. Contudo, a produção dos metabólitos secundários interfere diretamente no metabolismo primário, visto que compartilham muitos precursores das rotas biossintéticas, o que pode influenciar negativamente as fenofases reprodutivas.

b) Relação da sincronia da floração com polinizadores

A fenologia da floração é um dos principais fatores que definem a dinâmica temporal das interações entre plantas e polinizadores, podendo ser considerada no âmbito do indivíduo, da população ou da comunidade (Newstrom *et al.*, 1994), sendo importante manter a sincronização dos períodos de floração e da atividade dos polinizadores.

Em uma população, sabe-se que os indivíduos apresentam diferenças em relação à idade, tamanho, sexo e micro-habitat, fazendo com que a floração aconteça em momentos diversos (Newstrom *et al.*, 1994), reduzindo a competição por polinizadores. No que se refere à floração em comunidade, esta ocorre, mais frequentemente, de maneira agregada, devido às limitações fisiológicas. Assim, condições abióticas desfavoráveis, como seca e alta temperatura, interferem na disponibilidade de polinizadores, induzindo que a floração aconteça em um período ideal para a reprodução, resultando na sincronia entre os indivíduos de uma população e entre populações (Mitchell *et al.*, 2009).

Sabe-se que as interações planta-animal envolvidas na polinização são dependentes da biologia das espécies envolvidas, incluindo horário da antese e sua duração, tipo de recurso disponibilizado ao polinizador, morfologia da flor e do visitante, hábito e estratégia do animal durante a visita, época e duração de florescimento, além da proximidade da área de vida do polinizador (Proctor; Yeo; Lack, 1996).

A floração sincronizada favorece a atração de polinizadores e dispersores, além de saciar os herbívoros ou predadores (Mickeliunas; Pansarin; Sazima, 2006). Contudo, se a floração for muito intensa e altamente sincrônica pode reduzir a probabilidade de visitação de uma flor, caso os polinizadores sejam um recurso limitante (Kudo, 2006).

Assim, percebe-se que as informações sobre a polinização são complexas e auxiliam na compreensão das interações que ocorrem entre populações animais e vegetais, contribuindo para o processo evolutivo e adaptativo, sendo necessário considerar esse conhecimento em programas de restauração florestal e para a conservação dos ecossistemas naturais, favorecendo o manejo e a conservação de espécies endêmicas ou ameaçadas de extinção.

No Cerrado, a maior parte das interações de polinização envolve guildas de plantas, onde uma espécie tem suas flores morfológica e funcionalmente capazes de oferecer recursos para uma diversidade de visitantes e polinizadores, logo as interações muito específicas são raramente observadas (Oliveira; Gibbs, 2000).

c) Relação da sincronia da floração com formas de dispersão

A sincronia de floração e a interação com os dispersores representam aspectos fundamentais no contexto da ecologia das plantas, desempenhando um papel crucial na dinâmica dos ecossistemas.

Os dispersores, que podem ser animais, como aves e insetos, ou mesmo fatores abióticos, como o vento e água, contribuem para a disseminação dos propágulos, como sementes e frutos. A sincronia de floração influencia diretamente a eficiência dessa interação, uma vez que a produção de sementes está intimamente ligada à polinização bem-sucedida.

Segundo Ferreira *et al.* (2016), há forte relação entre a fauna e a flora do Cerrado, de modo que a predominância de espécies zoocóricas indicou a necessidade de preservação dos animais para a dispersão de propágulos, proporcionando condições adequadas de conservação.

A coevolução entre plantas e dispersores é evidente nesse processo, uma vez que as características específicas das flores e dos frutos muitas vezes evoluem para otimizar a atração e a eficácia na dispersão pelos agentes específicos envolvidos. Essa coevolução é especialmente visível em sistemas mutualísticos, nos quais plantas e dispersores estabelecem uma relação simbiótica, cada um obtendo benefícios recíprocos.

Portanto, compreender a sincronia de floração e as interações com os dispersores não apenas enriquece o conhecimento sobre os processos ecológicos subjacentes, mas também desempenha um papel vital na conservação da biodiversidade, uma vez que essas relações são essenciais para a manutenção da saúde e da resiliência dos ecossistemas.

d) Relação da sincronia da floração com disponibilidade de recursos

Cada estágio de desenvolvimento vegetal é fortemente limitado pelo ambiente, incluindo fatores edáficos e climáticos, como também pelas características fisiológicas. Floração e frutificação são fases fenológicas que estão intimamente ligadas ao ritmo sazonal, com destaque para os fatores abióticos que podem limitar diretamente a época de floração afetando a habilidade de produzir flores, ou indiretamente, afetando os vetores de pólen; além de limitar a época de amadurecimento dos frutos (Rathcke; Lacey, 1985).

A sincronização da floração, ainda, pode acarretar na competição das plantas por polinizadores, uma vez que se a oferta de flores para estes for grande, poderá ocorrer a escolha por aquelas que julgarem mais atraentes e compensadoras (Mitchell *et al.*, 2009).

O Cerrado, caracterizado por sua sazonalidade marcante e eventos climáticos extremos, demanda estratégias adaptativas por parte das plantas na busca pela eficácia reprodutiva, o que

depende da produção de carboidratos, os quais atuam como sinalizadores no florescimento e fornecem energia para a frutificação.

Diante disso, vale mencionar que os indivíduos desenvolvem várias estratégias visando a fenofase reprodutiva e perpetuação da espécie. Dentre estas, destacam-se as mudanças na estrutura da copa, as quais diminuem efetivamente o tamanho da planta, mudando seu dossel e induzindo alterações no metabolismo de carboidratos. Assim, em virtude da sazonalidade, os indivíduos vegetais tendem a desenvolver diversas adaptações fenológicas, como a entrada em fase de dormência durante o período seco, após abscisão foliar e morte dos ramos, seguida pela retomada do crescimento e floração/frutificação no período chuvoso. Essas fenofases, geralmente, são acompanhadas pela flutuação nos teores de carboidratos nas folhas ao longo do ciclo.

A perda das folhas durante a estação seca é outra estratégia adotada por algumas espécies em regiões com clima sazonal, como forma de evitar o estresse hídrico que ocorre em determinada época do ano, quando a disponibilidade de água é reduzida. Esse comportamento limita a quantidade de fotoassimilados, os quais são direcionados para a rebrota, o que pode retardar a floração e frutificação.

Entretanto, algumas espécies não perdem as folhas imediatamente no início da estação seca, o que, provavelmente, pode ser uma estratégia de reaproveitamento dos nutrientes, transferindo-os diretamente das folhas maduras para as folhas novas (Sarmiento; Goldstein; Meinzer, 1985). Esta condição é importante em áreas com baixa fertilidade do solo, como o Cerrado, já que ocorre uma redução do impacto da variação temporal na disponibilidade de nutrientes, por meio do armazenamento e reciclagem interna dos mesmos, o que favorece as fases reprodutivas.

Segundo Larcher (2000), durante o período de dormência, ocorre mobilização gradativa dos carboidratos, o que é acelerado com o fim desta fase, sendo os carboidratos solúveis conduzidos para as gemas em brotação que, por sua vez, formarão novos ramos e folhas. Em seguida, as flores e os frutos são supridos, seguidos pelo câmbio, por novas gemas em formação e, finalmente, pelos tecidos que servem como depósito de carboidratos em órgãos subterrâneos e aéreos da planta (Larcher, 2000).

Portanto, diante do exposto, percebe-se que a sincronia da floração está ligada à sazonalidade e à oferta de nutrientes, sendo que a sincronização temporal permite que as plantas otimizem a alocação de recursos para a produção de flores e sementes durante períodos mais favoráveis.

e) Relação da sincronia da floração com variabilidade genética

A variabilidade genética ocorre através de mecanismos como a recombinação genética, mutações e migração de genes, sendo que a sincronização da floração favorece a polinização cruzada, promovendo a mistura genética e contribuindo para a variabilidade genética dentro da população.

Sabe-se que a floração é uma resposta intrincada a diversos fatores ambientais, de modo que as plantas possuem um relógio biológico interno que responde a esses estímulos, determinando o momento exato da floração. Essa diversidade nas respostas florais é, em grande parte, atribuída à variabilidade genética presente nas populações vegetais, principalmente quanto: às cores e formas das flores, importante para a atração de polinizadores; ao tempo de

floração, importante porque a duração favorece a polinização e produção de sementes; à adaptação às condições ambientais, contribuindo para a definição de estratégias em resposta às mudanças climáticas e aos estresses, como seca, pragas ou doenças.

Esses fatores também são relevantes em programas de restauração florestal, principalmente no que se refere à adaptação às condições adversas, já que a variabilidade genética permite que as plantas se adaptem às situações específicas e uma população diversificada geneticamente tem uma maior capacidade de resistir ao ataque de pragas e doenças, pois algumas plantas podem ter características genéticas que as tornam mais resistentes, o que contribui para a sobrevivência, manutenção das fenofases e preservação das espécies.

f) O fogo e sua influência na fenologia das plantas do Cerrado

Apesar de promover a sincronia na floração de gramíneas de savanas neotropicais, a incidência de queimadas leva à produção de sementes com baixa porcentagem de germinação, o que limita o recrutamento de novos indivíduos dessas espécies (Fontenele *et al.*, 2020).

Em virtude da presença frequente do fogo em fitofisionomias de Cerrado, as vegetações savânicas e campestres são resistentes ao fogo visto o desenvolvimento de diversas estratégias de adaptação para coexistirem e até se beneficiarem desta perturbação. A relação fogo e fenologia deve ser considerada nos processos de restauração, para evitar a inclusão de espécies que não possuem adaptação a ele ou, ainda, que são capazes de alterar o regime do fogo, podendo ampliá-lo, mesmo com ações de prevenção.

Vale destacar as principais adaptações de resistência ao fogo:

- *casca espessa (suberização)*: funciona como um isolante térmico que ajuda a evitar que o calor excessivo chegue ao câmbio (Souchie, 2015), o qual é responsável pelo crescimento secundário e, se danificado, pode levar à morte do indivíduo (Taiz *et al.*, 2017);
- *brotação após o fogo*: A rebrota de espécies lenhosas, após a ocorrência de fogo, pode ocorrer a partir da copa, dos rizomas do caule e de estruturas subterrâneas (Coutinho, 1990). Entretanto, a capacidade de rebrota pode ser limitada pelas queimadas, sendo que quando estas são anuais tendem a diminuir a altura e diâmetro das rebrotas aumentando a taxa de mortalidade (Medeiros; Miranda, 2008), enquanto em indivíduos menores não apresentam suberização, tendo uma taxa maior de mortalidade da parte aérea que os indivíduos maiores submetidos as queimadas (Hofmann; Solbrig, 2003).
- *resistência das sementes ao fogo*: muitas sementes de Cerrado possuem revestimentos espessos e resistentes ao calor, que atua como uma barreira física, ajudando a preservar a integridade das sementes durante a exposição ao fogo. Assim, a incidência de fogo pode contribuir para a reprodução sexuada por facilitar a abertura de frutos ou infrutescência, possibilitando a liberação de sementes (Keely; Fotheringham, 2000), e aumentando a taxa da germinação devido à liberação de etileno, hormônio gasoso que atua na quebra de dormência (Taiz *et al.*, 2017). Contudo, as queimadas também podem ter efeitos negativos, visto que as altas temperaturas da superfície do solo podem danificar as sementes e inviabilizar a germinação;
- *folhas com adaptações à seca*: as condições ambientais após o fogo causam o desenvolvimento de plantas com características xeromórficas, com folhas pilosas e menor transpiração (Steuter; Mcpherson, 1995);

-
- *disponibilização de nutrientes*: a estocagem de nutrientes é uma estratégia que garante que as espécies consigam sobreviver em períodos de escassez, sendo que o armazenamento pode ocorrer em órgãos especializados, como raízes tuberosas e caules subterrâneos. Ademais, a decomposição da serapilheira, composta principalmente por folhas e outros detritos orgânicos que caem no solo, desempenha um papel vital na ciclagem de nutrientes no Cerrado;

Em síntese, as estratégias vegetais diante das queimadas e efeitos desta refletem uma adaptação complexa das plantas a um ambiente desafiador, e a compreensão deste processo é essencial para a conservação e manejo sustentável desse ecossistema.

- *Mudanças climáticas, fenologia vegetal e conservação do Cerrado*

Por ser uma ciência multidisciplinar e envolver áreas de estudos como biometeorologia, ecologia e biologia evolutiva, estudos fenológicos das plantas do Cerrado podem apresentar grande contribuição para a biologia da conservação desse bioma (Morellato *et al.*, 2016).

Mudanças na estrutura da vegetação de formações florestais do Cerrado, como a Mata seca e o Cerradão, podem aumentar ou diminuir a incidência de radiação nas folhas de sub-bosque, afetando a fisiologia das plantas que compõem esse estrato e alterar sua fenologia (Bencke; Morellato, 2002b). Diante disso, as alterações edafoclimáticas as quais o Cerrado está sujeito devido a sua intensa exploração, como perda de cobertura vegetal, aumento nas temperaturas ambientais, modificações na dinâmica de precipitações dentre outras, podem afetar as características intrínsecas de cada fitofisionomia desse bioma e alterar os padrões fenológicos de sua vegetação (Novaes *et al.*, 2020; Hofmann *et al.*, 2021). Todas essas modificações em conjunto podem acarretar perda significativa na diversidade florística, mudanças no microclima da região e alterações nas interações fauna-flora do Cerrado.

Além disso, determinar a fenologia das plantas em ecossistemas neotropicais é especialmente relevante em cenários recentes de mudanças climáticas globais porque os dados fenológicos podem ser usados para investigar as respostas da vegetação ao clima, o que pode orientar os esforços de conservação e prever impactos futuros (Mendoza; Peres; Morellato, 2017).

Outro fator relevante é que as fenofases das plantas desempenham um papel importante na promoção da biodiversidade e na prestação de serviços ecossistêmicos. Ao restaurar áreas degradadas, não apenas se recupera a vegetação, mas também se cria um ambiente propício para a fauna local, contribuindo para a conservação de espécies e a manutenção de processos ecológicos essenciais, como polinização e dispersão de sementes.

3.3 Considerações finais

O Cerrado apresenta características únicas que desafiam os esforços de restauração florestal, o que está associado ao comportamento fenológico das espécies, com destaque para a sincronização da floração, um fenômeno crucial na ecologia, que desempenha um papel significativo nesse contexto, sendo que compreender essas interações é essencial para promover estratégias de restauração bem-sucedidas e sustentáveis.

A floração no Cerrado é notável pela sua sincronia, um processo adaptativo que envolve fenômenos como herbivoria, polinização, dispersão e competição por recursos, correspondendo

a uma estratégia evolutiva que maximiza o sucesso reprodutivo das plantas, essencial para a preservação da biodiversidade característica do bioma.

No entanto, a restauração florestal no Cerrado enfrenta grandes desafios, como a variabilidade nas condições edafoclimáticas e incidência de queimadas, o que demanda o desenvolvimento de estratégias adaptativas para sobrevivência e reprodução.

Diante das mudanças climáticas globais, tem-se desencadeado impactos substanciais na fenologia vegetal, alterando os padrões temporais de eventos no ciclo de vida das plantas. Essa interação complexa entre as mudanças climáticas e a fenologia vegetal é uma área de crescente preocupação e pesquisa científica, pois tem implicações significativas para os ecossistemas, a biodiversidade e até mesmo para a agricultura.

Portanto, para obtenção de sucesso em campanhas de restauração ambiental é fundamental o acompanhamento das fenofases das plantas, garantindo a eficácia, a sustentabilidade e a resiliência dos ecossistemas restaurados. O conhecimento e a aplicação adequada desse conceito são essenciais para promover a conservação da biodiversidade e o equilíbrio dos ecossistemas, contribuindo para a saúde do planeta e o bem-estar das gerações futuras.

Referências

- ANDREIS, C.; LONGHI, S. J.; BRUN, E. J. *et al.* Estudo fenológico em três fases sucessionais de uma floresta estacional decidual no município de Santa Tereza, RS, Brasil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 55-63, 2005.
- BARBOSA, D. C. A.; BARBOSA, M. C. A.; LIMA, L. C. M. Fenologia de espécies lenhosas da caatinga, *In*: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Eds.). **Ecologia e conservação da caatinga**. Recife: Editora da Universidade Federal de Pernambuco, p. 657-693, 2003.
- BENCKE, C. S. C.; MORELLATO, L. P. C. Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 25, p. 269-275, 2002a.
- BENCKE, C. S. C.; MORELLATO, L. P. C. Estudo comparativo da fenologia de nove espécies arbóreas em três tipos de floresta atlântica no sudeste do Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 25, p. 237-248, 2002b.
- BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. *In*: REGO, C. M.; NEGRELLE, R. R. B.; MORELLATO, L. P. C. **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**. Editora Colombo: Embrapa Florestas, p. 291-310, 2007.
- BORCHERT, R. Responses of tropical trees to rainfall seasonality and its long-term changes. **Climate Change**, v. 39, p. 381-393, 1998.
- BULHÃO, C. F.; FIGUEIREDO, P. S. Fenologia de leguminosas arbóreas em uma área de cerrado marginal no nordeste do Maranhão. **Brazilian Journal of Botany**, v. 25, p. 361-369, 2002.

-
- CAMARGO, A. P. Potencial agrícola do cerrado. In: KLEIN, A. L. (Org.). **Eugen Warming e o Cerrado Brasileiro: um século depois**. São Paulo: Editora UNESP, p. 121-130, 2002.
- COLADO, M. L. Z. **Técnicas de restauração ecológica**. Laboratório de Ecologia da Intervenção UFMS. Disponível em: <https://leiufmsbr.wixsite.com/leiufms/post/t%C3%A9cnicas-de-restaura%C3%A7%C3%A3o-ecol%C3%B3gica>. Acesso em: 02 mar. 2024.
- COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (ed.). **The fire in tropical biota Ecological Studies**, v. 84. Berlin: Springer-Verlag, p. 82-105, 1990.
- COUTINHO, P. R. DE O. DOS S.; VALCARCEL, R.; RODRIGUES, P. J. F. P.; BRAGA, J. M. A. Restauração passiva em pastagens abandonadas a partir de núcleos de vegetação na Mata Atlântica, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1307–1323, 2019.
- CROAT, T. B. Phenological behavior of habit and habitat classes on Barro Colorado Island (Panama and Canal Zone). **Biotropica**, v. 7, p. 270-277, 1975.
- FERRARO, A.; SILVA, G. S.; MARTINS, A. R.; PIEDADE, S. M. D. S.; FIDELIS, A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. Seasonality affects the below-ground bud bank dynamics of the Cerrado. **Journal of Vegetation Science**, v. 33, n. 6, p. e13165, 2022.
- FERREIRA, R. Q. S.; CAMARGO, M. O.; TEIXEIRA, P. R.; SOUZA, P. B.; VIANA, R. H. O. Uso potencial e síndromes de dispersão das espécies de três áreas de cerrado *Sensu stricto*, Tocantins. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 73-86, 2016.
- FONTENELE, H. G. V.; CRUZ-LIMA, L. F. S.; PACHECO-FILHO, J. L.; MIRANDA, H. S. Burning grasses, poor seeds: post-fire reproduction of early-flowering Neotropical savanna grasses produces low-quality seeds. **Plant Ecology**, v. 221, n. 12, p. 1265-1274, 2020.
- FORREST, J.; MILLER-RUSHING, A. J. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 365, p. 3101-3112, 2010.
- FOURNIER, L. A. Estudio preliminares sobre la floración em el Roble de Sabana, *Tabebuia pentaphylla* (L.) Hensl. **Revista de Biología Tropical**, v. 15, p. 259-267, 1969.
- GENTRY, A. H. Flowering phenology and diversity in tropical Bignoniaceae. **Biotropica**, v. 6, p. 64-68, 1974.
- HOFFMAN, W. A.; SOLBRIG, O.T. The role of topkill in the differential response of savanna woody species to fire, **Forest Ecology and Management**, v. 180, p. 273-276, 2003.
- HOFMANN, G. S. *et al.* The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, n. 17, p. 4060-4073, 2021.
- KEELY, J. E.; FOTHERINGHAM, C. J. Role of fire in regeneration from seed. In: FENNER, M. (Ed.) **Seeds: the ecology of regeneration in plant communities**, Oxon: CAB International, p. 311-330, 2000.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 431p. 2012.

-
- KUDO, G. Flowering phenologies of animal-pollinated plants: reproductive strategies and agents of selection. *In*: HARDER, L. D.; BARRETT, S. C. H. (Eds). **Ecology and Evolution of Flowers**. New York: Oxford University Press, p. 139-158, 2006.
- LACERDA, V. O.; MAPELI, A. M. Efeitos da sazonalidade sobre a fenologia e a fisiologia de *Parkia platycephala* Benth (Fabaceae, Caesalpinioideae) em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1344-1363, 2021.
- LARCHER, W. O balanço de carbono nas plantas. *In*: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, p. 69-182, 2000.
- LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. Diretrizes para a Restauração de Paisagens Florestais na Mata Atlântica e Amazônia brasileiras. Instituto Internacional para a Sustentabilidade. 28p. Disponível em: https://www.iis-rio.org/wp-content/uploads/2020/12/IIS-Diretrizes_para_RPF.pdf. Acesso: 28 fev. 2024.
- LENZA, E.; KLINK, C. A. Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 29, p.627-638, 2006.
- LONGHI, S. J. Fenologia de algumas espécies florestais e ornamentais. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v. 14, n, 3 - 4, p. 231- 240, 1984.
- MASCHINSKI, J.; WHITHAM, T. G. The continuum of plant responses to herbivory: the influence of plant association, nutrient availability, and timing. **The American Naturalist**, v. 134, n. 1, p. 1–19. 1989.
- MEDEIROS, M. B.; MIRANDA, H. S. Post-fire resprouting and mortality in cerrado woody plant species, **Edinburgh Journal of Botany**, v. 65, n. 1, p. 1-16, 2008.
- MEIRELES, A. C. *et al.* Phenological synchronicity of *Byrsonima pachyphylla* A. Juss. and *B. verbascifolia* (L.) DC. (Malpighiaceae) and its relation with climate seasonality. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4718, 2023.
- MENDOZA, I.; PERES, C. A.; MORELLATO, L. P. C. Continental-scale patterns and climatic drivers of fruiting phenology: A quantitative Neotropical review. **Global and Planetary Change**, v. 148, p. 227-241, 2017.
- MICKELIUNAS, L.; PANSARIN, E. R.; SAZIMA, M. Floral biology, melittophily and influence of curculionid beetles on the reproductive success of *Grobya amherstiae* Lindl. (Orchidaceae: Cyrtopodiinae). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 29, p. 251-258, 2006.
- MITCHELL, R. J.; FLANAGAN, R. J.; BROWN, B. J.; WASER, N. M.; KARRON, J. D. New frontiers in competition for pollination. **Annals of Botany**, v. 103, p. 1403-1413, 2009.
- MORELLATO, L. P. C. *et al.* Linking plant phenology to conservation biology. **Biological Conservation**, v. 195, p. 60-72, 2016.
- NEWSTROM, L. E.; FRANKIE, G. W.; BAKER, H. G. A new classification for plant phenology based on flowering patterns in lowland tropical rain forest trees at La Selva, Costa Rica. **Biotropica**, p. 141-159, 1994.

-
- NOVAES, L. R. *et al.* Environmental variables drive phenological events of anemocoric plants and enhance diaspore dispersal potential: a new wind-based approach. **Science of the Total Environment**, v. 730, p. 139039, 2020.
- OLIVEIRA, P. E.; GIBBS, P. E. Reproductive biology of woody plants in a cerrado community of the central Brazil. **Flora**, v. 195, p. 311-329, 2000.
- OTÁROLA, M. F.; ROCCA, M. A. Flores no tempo: a floração como uma fase da fenologia reprodutiva. *In*: RECH, A. R. *et al.* **Biologia da polinização**, Projeto Cultural. Rio de Janeiro, p. 113-128, 2014.
- PILON, N. A. L.; UDULUTSCH, R. G.; DURIGAN, G. Padrões fenológicos de 111 espécies de Cerrado em condições de cultivo, **Hoehnea**, v. 42, n. 3, p. 425-443, 2015.
- PIRANI, F. R.; PEDRONI, F. Fenologia de uma comunidade arbórea em cerrado sentido restrito, Barra do Garças, MT, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, p. 1096-1110, 2009.
- PROCTOR, M.; YEO, P.; LACK, A. **The natural history of pollination**. Portland: Timber Press. 1996.
- RATHCKE, B.; LACEY, E. P. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 16, p. 179-214, 1985.
- REICH, P. B.; R. BORCHERT. Phenology and ecophysiology of the tropical tree, *Tabebuja neochrysantha* (Bignoniaceae). **Ecology**, v. 63, p. 294-299, 1982.
- SAMPAIO, A. B.; RIBEIRO, K. T.; VIEIRA, D. M.; DA SILVA, D. C. B. **Guia de restauração ecológica para gestores de unidades de conservação**. 1. Ed. Brasília, DF: Instituto Chico Mendes, 2021.
- SANTOS, F. P.; FERREIRA, W. M. Estudo fenológico de *Davilla elliptica* St. Hill. e *Qualea grandiflora* Mart. em uma área de Cerrado sentido restrito em Porto Nacional, Tocantins. **Interface**, v. 5, p. 3-14, 2012.
- SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptive strategies of woody species in neotropical savannas. **Biological Review**, v. 60, p. 315-355, 1985.
- SARMIENTO, G.; MONASTERIO, M. **Life forms and phenology**. *In*: BOULIERE, F. (Ed.). Ecosystems of the world: tropical savannas. Amsterdam: Elsevier, p. 79-108, 1983.
- SCHWARTZ, M. D. **Phenology: an integrative environmental science**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- SOUCHIE, F. F. Rebrotas de indivíduos lenhosos em área de cerrado sentido restrito como resposta ao fogo. 2015. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)** - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- STEUTER, A. A.; McPHERSON, G. R. Fire as a physical stress. *In*: BEDUNAH, D. J.; SOSEBEE, R. E. **Wildland plants physiological ecology and developmental morphology**. Denver: Society for Range Management, p. 550-579, 1995.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6th. ed. Porto Alegre: Artmed. 888p. 2017.
- THOMPSON, J. N. **The geographic mosaic of coevolution** – The University of Chicago Press. 443p. 2005.

TOMLINSON, P. B. **The biology of trees native to tropical Florida**. Harvard University Printing Office, Allston, Massachusetts, 1980.

WARDLAW, I. F. The control of carbon partitioning in plants. **New Phytologist**, v. 116, p. 341-381, 1990.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Restauração Ecológica no Brasil: Desafios e Oportunidades**. 2017. Disponível em:
https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/restauracao_ecologica_1.pdf. Acesso em: 28 fev. 2024.

CAPÍTULO 4

BIODIVERSIDADE DA FAUNA DE VERTEBRADOS NO DOMÍNIO CERRADO

Valmir Dâmaso de Almeida Júnior
Renata Cristina da Silva Costa

Resumo

O Brasil é considerado o país com a maior diversidade biológica do mundo, com seis ecorregiões de domínio morfoclimático, sendo um deles, o Domínio dos Cerrados, localizada na região central do Brasil, possui diferentes formações vegetacionais, sendo considerado a Savana com maior biodiversidade do mundo, com elevado grau de endemismo da flora e fauna. Destaca-se pela abundância de espécies endêmicas, com cerca de 2.373 espécies de vertebrados: 251 de mamíferos, 856 de aves, 800 de peixes, 262 de répteis e 204 de anfíbios, destas, 18,2% são endêmicas deste bioma. Os Vertebrados compõem um grupo extremamente diversificado, com aproximadamente 45.000 espécies atuais, ocupando praticamente todos os habitats da Terra e, comportamentos tão diversos quanto sua morfologia, caracterizando-se como um grupo de animais que possuem vértebras, sistema nervoso complexo, alto grau de mobilidade e um plano corpóreo distinto, o que lhes permitiu uma irradiação adaptativa excepcional, subdivididos, de acordo com o grau de exigência alimentar ou comportamental, em espécies generalistas e especialistas. Quanto a ação antrópica, esta tem alterado significativamente a diversidade e composição das espécies, atualmente os mamíferos são considerados entre os grupos da fauna, os mais ameaçados de extinção. Dessa forma, o conhecimento da fauna em geral é imprescindível, pois os animais participam ativamente da construção e manutenção dos ecossistemas. Quanto maior o conhecimento sobre a ecologia dos animais de vida livre, maior será a capacidade de utilizar recursos naturais com menor impacto sobre o ecossistema. Uma das faces da vida animal que precisa ser entendida é a sua distribuição em uma dada região, ou seja, como os animais utilizam o espaço onde vivem. Portanto, se faz necessário acesso a um grande número de animais silvestres para que seja possível se obter excelentes amostragens com fins de pesquisas ligadas à sistemática, genética, parasitologia, reservatórios de doenças tropicais, além de poder fornecer valiosos espécimes para pesquisas médicas, Coleções Científicas, Parques e Jardins Zoológicos.

4.1 Introdução

O Brasil é considerado o país com a maior diversidade biológica do mundo (Paglia *et al.*, 2012), e a grande variedade de habitats e extensão territorial são dois dos fatores que contribuem para esta diversidade. Os domínios morfoclimáticos brasileiros são definidos a partir das características climáticas, botânicas, pedológicas, hidrológicas e fitogeográficas. Com esses aspectos é possível delimitar no Brasil, seis ecorregiões de domínio morfoclimático, sendo um deles, o Domínio dos Cerrados, localizado na região central do Brasil (Ab'Sáber, 2003).

O Cerrado, reconhecido mundialmente como uma vegetação savânica, possui diferentes formações ambientais e é caracterizado como um bioma paisagisticamente heterogêneo. Segundo Ribeiro & Walter (2008), o bioma é dividido em três formações vegetacionais e subdivididas em 11 fitofisionomias distintas: Formações Florestais (com mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão), Formações Savânicas (com “cerrado sentido restrito”, vereda, parque de cerrado e palmeiral) e Formações Campestres (com campo sujo, campo limpo e campo rupestre). Dessa forma, trata-se de um complexo vegetacional, que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras Savanas da América tropical, da África e da Austrália (Ribeiro; Walter, 1998).

Considerado a Savana com maior biodiversidade do mundo (Mittermeier *et al.*, 2005), o Cerrado brasileiro apresenta-se com elevado grau de endemismo da flora e fauna (e.g. Mendonça *et al.*, 2008). Com sua localização estratégica em relação a outros biomas, o Cerrado destaca-se pela abundância de espécies endêmicas, abrigando cerca de 2.373 espécies de vertebrados, sendo: 251 mamíferos, 856 espécies de aves, 800 espécies de peixes, 262 répteis e 204 anfíbios, das quais 18,2% são endêmicas deste bioma (Critical Ecosystem Partnership Fund Ecosystem Profile Cerrado Biodiversity Hotspot, 2018).

Pesquisas mostram que, entre 1998 e 2008, 1.300 novas espécies de vertebrados foram descritas por cientistas no Brasil (Cavalcanti *et al.*, 2012), destas, 346 espécies de vertebrados foram encontradas em locais de Cerrado, sendo 222 novas espécies de peixes, 40 anfíbios, 57 répteis e 27 mamíferos. Estes números reveladores reforçam a relevância biológica colossal do Cerrado.

A heterogeneidade espacial no Bioma, com grande variação dos ecossistemas ao longo do espaço, seria um fator determinante para a ocorrência de um variado número de espécies, diferindo da Amazônia e Mata Atlântica que apresentam essa variação de forma estratificada e vertical, o que também proporciona oportunidades diversas para o estabelecimento das espécies (Machado *et al.*, 2004). Esta grande diversidade de espécies de animais e plantas do Cerrado está associada à sua localização estratégica e central em relação aos outros biomas, o tamanho desta área e a variedade de ambientes.

De acordo com Aguiar e Camargo (2004), a biodiversidade e a riqueza de formações vegetais são elevadas, devido à fronteira que o Cerrado faz com as florestas Amazônica e Atlântica, a Caatinga e o Pantanal, fato que possibilita a troca de material genético entre estes.

Muito embora as fisionomias do Cerrado compartilhem espécies com outros biomas, sendo as florestas tropicais úmidas uma importante fonte de origem das espécies do Cerrado (Simon; Pennington, 2012), a flora do bioma é característica e diferenciada dos biomas adjacentes (Heringer *et al.*, 1977). Um dos fatores pode estar relacionado à estação climática bem definida, com período de seca entre maio e setembro, e período chuvoso entre outubro e abril. Nesse contexto, o comportamento dos ciclos anuais de floração, frutificação e brotação foliar de suas espécies, se ajusta a essas condições, desencadeando uma forte influência sobre a fauna. A estrutura da vegetação e sua composição florística mostram-se como importantes fatores contribuindo para a estruturação da macrofauna, colaborando de maneira seletiva para os registros de diferentes nichos ecológicos.

Estima-se que existam um número de 320.000 espécies da fauna no Cerrado. A fauna de invertebrados do Cerrado ainda é pouco conhecida, porém estima-se que existam pelo menos 90 mil espécies (Dias, 1992) e que um grande número dessas sejam endêmicas (Klink;

Machado, 2005), número considerado subestimado em virtude da escassez de estudos sobre esses organismos. Os vertebrados são os animais mais lembrados quando o assunto é o reino animal, é um grupo extremamente diversificado, com aproximadamente 45.000 espécies atuais, ocupando praticamente todos os habitats da Terra, apresentando comportamentos tão diversos quanto sua morfologia (Pough *et al.*, 2003).

Os vertebrados exercem um papel fundamental para manter a conservação de grandes remanescentes de vegetação nativa, uma vez que são fundamentais para manutenção de diversos processos, entre estes: ciclos de vida, abrigo, bancos genéticos, polinização e dispersão de sementes, embora representem um número bem menor que a fauna de invertebrados. Englobam o subfilo Vertebrata do filo Chordata (animais que apresentam notocorda na fase inicial de desenvolvimento), caracterizando-se como um grupo de animais que possuem vértebras, sistema nervoso complexo, alto grau de mobilidade e um plano corpóreo distinto (Hickman *et al.*, 2004), o que lhes permitiu uma irradiação adaptativa excepcional.

Entretanto, as intervenções humanas podem levar à exaustão da estrutura, da diversidade da vegetação (Liddle; Scorgie, 1980) e conseqüentemente alterar o habitat de diversas espécies animais, causando o declínio de vertebrados especialistas em favor dos generalistas (Van-Rooy; Stumpel, 1995). É possível perceber que cada espécie possui um conjunto de tolerâncias a condições físicas que determinam sua amplitude de distribuição potencial (Pehek, 1995).

Declínios populacionais têm ocorrido por motivos não muito bem compreendidos, mas parecem ser influenciadas, principalmente pelo desmatamento, fragmentação de habitats e suas conseqüências. Algumas espécies como *Panthera onca* Linneu, 1758 (onça-pintada) utilizam o Cerrado como área transicional entre outros biomas circunvizinhos como o Pantanal, Amazônico e Caatinga. As onças-pintadas recorrem a grandes áreas de vida e, como muitos grandes predadores, vivem essencialmente de forma solitária. A densidade de presa disponível é provavelmente determinante e a quantidade de comida condiciona, de fato, a superfície dos territórios, e as áreas vitais atravessadas por cada animal, podem variar de 5 a 500 km². Estudos de populações de onça pintada no Brasil têm uma densidade média estimada de uma onça a cada 25 km². Outra espécie que transita entre o Cerrado e a Caatinga é o *Chrysocyon brachyurus* Illiger, 1815 (lobo-guará), maior canídeo brasileiro e hábitos alimentares oportunistas, variando entre grandes e pequenos vertebrados, alguns artrópodes e até vegetais. São animais de hábitos monogâmicos – ao longo do período reprodutivo, vivem em áreas que variam de 20 km² a 115 km², a depender da disponibilidade de alimentos, e são bastante territorialistas.

Nem todas as espécies são afetadas da mesma forma pelas mudanças físicas ao seu redor, mas este processo muda os mesohabitats e microhabitats disponíveis e, portanto, todas as comunidades acabam sendo afetadas (Cerqueira *et al.*, 2005). Segundo Redford (1992) a densidade em que uma determinada espécie animal se estabelece em cada área depende da disponibilidade de recursos no ambiente, da competição intra e interespecífica e da pressão efetuada pelos predadores (inclusive humanos) e parasitas nas populações. Dessa forma, os animais podem ser divididos, de acordo com o grau de exigência em generalistas, espécies pouco exigentes, apresentam hábitos alimentares variados, altas taxas de crescimento e alto potencial de dispersão; e as espécies especialistas, espécies extremamente exigentes quanto aos habitats que ocupam.

As espécies generalistas possuem nichos mais amplos e se adaptam mais facilmente que outras a novas situações. Vivem em áreas de vegetação mais aberta ou mata secundária, são

altamente tolerantes a mudanças ambientais e são capazes de aproveitar eficientemente diferentes recursos oferecidos pelo ambiente. Dentre estas, podem ser citadas espécies como o *Thraupis sayaca* Linnaeus, 1766 (sanhaço), *Didelphis albiventris* Lund, 1840 (gambá), *Carollia perspicillata* Linnaeus, 1758 (morcego), *Cariama cristata* Linnaeus, 1766 (seriema) entre outros. Cabe destacar que a capacidade de adaptação dessas espécies não significa necessariamente que sejam mais bem sucedidas do que as espécies especialistas, pois, muitas vezes, tais organismos podem ocupar nichos que já estão ocupados, desencadeando processos de competição. Os especialistas são caracterizados por animais que vivem em áreas de floresta primária ou secundária em alto grau de regeneração, que necessitam de grandes áreas para sobreviverem e apresentam uma dieta bastante específica. Alguns destes animais, por representarem o topo de cadeias alimentares, possuem um número reduzido de filhotes, o que dificulta ainda mais a manutenção destas populações. Além disso, sua redução pode dificultar o encontro de possíveis parceiros para reprodução, comprometendo assim a prole, podendo levar ao declínio populacional. Para este grupo, a alteração do ambiente significa a necessidade de procurar novos habitats que apresentem condições semelhantes às anteriormente encontradas em seu hábitat original (Teixeira *et al.*, 2009). No Cerrado algumas espécies se enquadram nestas características, entre estas: *Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus, 1758 (tamanduá-bandeira) e *Tamandua tetradactyla* Linnaeus, 1758 (tamanduá-mirim).

De maneira geral, as densidades de vertebrados, em condições naturais, estão relacionadas com suas biomassas e dietas. Espécies de maior tamanho ocorrem em menores densidades do que as de menor porte, e espécies com dietas específicas e que ocupam níveis tróficos elevados possuem densidades mais baixas do que as espécies que apresentam dietas diversificadas. Porém, a ação antrópica tem alterado significativamente a diversidade e composição das espécies, atualmente os mamíferos são considerados entre os grupos da fauna, os mais ameaçados de extinção. Estudos demonstram que a caça, mesmo a de sobrevivência, pode levar ao declínio e ao desaparecimento local de determinadas espécies animais (Redford, 1992; Peres, 1996).

Com a variação de ambientes, as espécies de animais e plantas apresentam uma grande associação com os ecossistemas locais, podendo ser encontrados vários exemplos de espécies associadas a ambientes específicos. Assim, aves como o *Antilophia galeata* (Lichtenstein, 1823) (soldadinho) ou o *Basileuterus leucophrys* (Lovette *et al.*, 2010) (pula-pula-de-sobrancelha) somente podem ser encontradas em matas ciliares (Machado, 2000); mamíferos como o ratinho *Kunsia fronto* (Winge, 1887) só existem em fisionomias de Cerrado mais denso (Marinho-Filho *et al.*, 2002); e lagartos como o *Ameivula ocellifera* Spix, 1825 (calanguinho-listrado) só ocorrem em cerrados de terrenos arenosos.

De acordo com Freitas e Silva (2005), devido à grande ação antrópica e a suas atividades, o Cerrado passou por grandes modificações, alterando os diversos habitats, e conseqüentemente apresentando espécies ameaçadas de extinção, como o *Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus, 1758 (tamanduá-bandeira), a *Tapirus terrestris* Linnaeus, 1758 (anta), *Chrysocyon brachyurus* Illiger, 1815 (lobo-guará), *Tolypeutes tricinctus* Linnaeus, 1758 (o tatu-bola), *Priodontes maximus* Kerr, 1792 (tatu-canastra), *Speothos venaticus* Lund, 1842 (cachorro-do-mato) e a *Panthera onca* Linnaeus, 1758 (onça-pintada).

A fragmentação de habitats promove o isolamento de populações dependentes de habitats florestais e impede ou dificulta a migração de espécies entre fragmentos, podendo levar à extinção local de espécies especialistas (Laurence, 1994; Turner, 1996; Harrington *et al.*, 2001).

Do outro lado, espécies generalistas podem ser favorecidas com o processo de fragmentação por apresentarem maiores tolerâncias às alterações ambientais e maior amplitude ecológica (Umapathy; Kuma, 2000). Segundo a CRITICAL ECOSYSTEM PARTNERSHIP FUND ECOSYSTEM PROFILE CERRADO BIODIVERSITY HOTSPOT (2018), o Cerrado é uma das principais áreas do planeta para a produção agrícola e pecuária, e considerando o potencial, cerca da metade do bioma já teve sua vegetação original suprimida, colocando em risco a biodiversidade rica, única e útil assim como todos os seus serviços ecossistêmicos. A pressão contínua intensa considerando a demanda por alimentos, expansão agropecuária, incluindo a produção de importantes commodities agrícolas como soja, cana-de-açúcar, carne, algodão e também, eucalipto, produtos que são essenciais para a economia nacional e para os mercados mundiais.

4. 2 Contextualização

4. 2.1 Descrição da Fauna de Vertebrados - Mamíferos

O Brasil abriga um total de 775 espécies de mamíferos, distribuídas em 249 gêneros, 51 famílias e 11 ordens, sendo considerado o país com a maior diversidade biológica do mundo (SBM, 2023), sendo a grande variedade de habitats e a extensão territorial dois dos fatores que contribuem para esta diversidade. Do total de mamíferos confirmados no Brasil, 251 espécies são registradas no Cerrado (Critical Ecosystem Partnership Fund Ecosystem Profile Cerrado Biodiversity Hotspot, 2018), sendo 15% consideradas endêmicas (Paglia *et al.*, 2012).

Esse grupo recebeu essa denominação em função da presença de órgãos glandulares secretores de leite, presentes nas fêmeas, responsáveis por nutrir os filhotes (Pough *et al.*, 2003). Além das glândulas mamárias, a pele dos mamíferos contém outros tipos de glândulas importantes, como as glândulas sebáceas, responsáveis pela oleosidade da pele, glândulas sudoríparas, que promovem a regulação da temperatura e eliminação de sais através do suor, bem como as glândulas odoríferas, utilizadas nas interações sociais (Alves *et al.*, 2016). Outra característica são os pelos, que recobrem a maioria dos mamíferos, sendo essenciais para impermeabilização e proteção contra o calor e o frio e ainda podem desempenhar funções adicionais, como a camuflagem, comunicação e sensação (tato), por meio das vibrissas (bigodes) (Pough *et al.*, 2003).

Os mamíferos são encontrados em praticamente todos os ambientes do planeta, e em vários habitats, sendo possível caracterizá-los como terrícolas, semi-arborícolas, arborícolas, aquáticos, e aqueles que desenvolveram mecanismo de voo (Chiroptera). Há diversas razões para essa dispersão, tais como, apresentar mecanismos eficientes de economia de água, homeotermia e sistemas fisiológicos bem desenvolvidos, como o nervoso e o muscular, que permitem a sobrevivência e reprodução nas mais diversas condições (Orr, 1986).

Com relação ao papel funcional, mamíferos de médio e grande porte terrestres, tais como artiodáctilos *Subulo gouazoubira* Fischer, 1814 (veado-catingueiro) ou *Ozotoceros bezoarticus* Linnaeus, 1758 (veado-campeiro), perissodáctilos *Tapirus terrestris* Linnaeus, 1758 (anta) e roedores de grande porte *Dasyprocta azarae* Lichtenstein, 1823 (cutia) desempenham importante papel na manutenção da diversidade das florestas, isto por meio da dispersão, predação de sementes e de plântulas (Fragoso, 1994), são considerados como agentes de dispersão, auxiliando na regeneração e diversificação das espécies vegetais, ao passo que os

carnívoros regulariam as populações de herbívoros e frugívoros (Emmons, 1987). Já os pequenos mamíferos não-voadores, grupo ecológico mais diversificado de mamíferos, além de influenciarem na dinâmica florestal, são bons indicadores de alterações locais do habitat e da paisagem (Pardini; Umetsu, 2006). O fato dos mamíferos possuírem uma importante função ecológica por manterem o equilíbrio de uma floresta, e em contrapartida sofrerem uma crescente ameaça à sua existência, mostra a necessidade de maiores estudos sobre o grupo, não somente para a preservação dessas espécies, mas do ecossistema como um todo (Almeida *et al.*, 2008). Algumas espécies como *Cerradomys subflavus* (Wagner, 1842) (rato-do-cerrado), *Gracilianus agilis* (Burmeister, 1854) (rato-cachorro), *Galea spixii* (Wagler, 1831) (preá), *Sylvilagus brasiliensis* (Linnaeus, 1758) (lebre), exercem importância em áreas de Cerrado, merecendo destaque pelo seu papel na manutenção dos serviços ecossistêmicos e ambientais.

Para Freitas e Silva (2005), os mamíferos constituem o grupo de vertebrados mais derivado, do ponto de vista evolutivo, e contempla a maior parte dos animais selvagens brasileiros de médio e grande porte. Entre seus representantes temos gambás, tatus, tamanduás, roedores, felinos, morcegos, e macacos, além de muitas outras espécies. Estes exemplos demonstram que a classe é uma das mais variadas em termos morfológicos e de ocupação de habitats.

Uma característica importante do comportamento de muitas espécies de mamíferos é a sociabilidade na formação de grupos estruturados, que se beneficiam na busca por alimentos e na fuga de predadores. No entanto, a maioria das espécies são solitárias, sendo observadas, aos pares, somente nos períodos reprodutivos (Pough *et al.*, 2003, Reis *et al.*, 2006). Outra forma de categorizar os mamíferos é em relação ao seu horário de atividade, ou seja, o período em que eles se encontram ativos. De acordo com sua biologia, os mamíferos podem ser diurnos, noturnos ou catemerais (usam o dia e a noite nas mesmas proporções) (Van Schaik; Griffiths, 1996).

Entretanto, a ação antrópica tem alterado significativamente a diversidade e composição das espécies. Entre os mamíferos, existe uma variação muito grande de tamanho corpóreo, hábitos de vida e preferência de habitat. Os hábitos predominantemente noturnos da maioria das espécies, as áreas de vida relativamente grandes e as baixas densidades populacionais, juntamente com a ação predatória do homem levam ao declínio nas populações. Atualmente os mamíferos são considerados entre os grupos da fauna, os mais ameaçados de extinção (Freitas, Silva, 2005).

Um aspecto importante que deve ser levado em conta para se definir o quanto uma área degradada compromete a vida de um grupo é analisar a área de vida e o comportamento espacial dos indivíduos com relação ao grau de tolerância à presença de outros indivíduos da mesma espécie ou não, a fim de identificar e analisar interações, fidelidade territorial e padrões de uso de habitat, pois este engloba diversos recursos necessários à sobrevivência de populações (alimento, abrigo, entre outros) (Almeida Júnior, 2022).

Segundo Freitas e Silva (2005) *Subulo gouazoubira* Fischer, 1814 (veado-catingueiro) e *Mazama americana* Erxleben, 1777 (veado-mateiro), por exemplo, são animais considerados raros, de comportamento solitário, apresentam uma área de vida relativamente grande e, comumente encontrados na região do Cerrado.

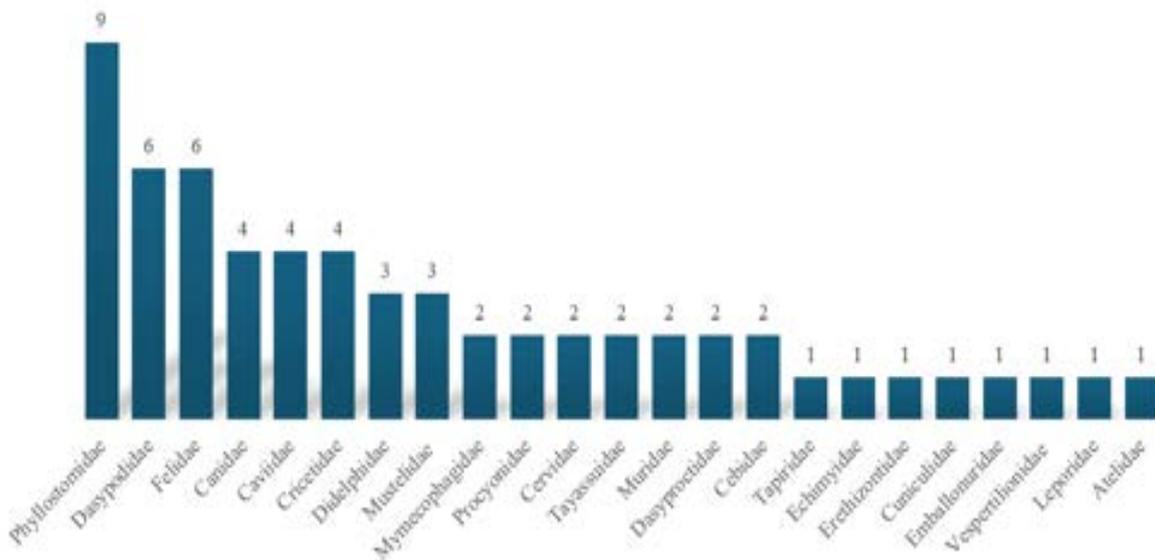
A baixa densidade ou a extinção local de predadores de topo aparentemente leva também ao aumento da densidade de espécies de hábitos generalistas, o que pode, por sua vez, causar

alterações drásticas nas comunidades de pequenos vertebrados, como aves ou pequenos mamíferos (Fonseca; Robinson, 1990). Espécies de carnívoros, topo de cadeia alimentar, são as mais sensíveis à fragmentação dos habitats, ao passo que os e ungulados têm sido alvo de intensa caça (MMA, 2008).

Por meio do método denominado *Rapid Assessment Project* - RAP (Parker; Carr, 1992; Foster *et al.*, 1994), levantamentos e inventários conduzidos em diferentes áreas de Cerrado no MATOPIBA, cuja sigla compõem um celeiro agrícola formado pelo conglomerado de Estados: Maranhão, Tocantins, Piauí, Bahia, identificou-se a ampla ocorrência das espécies da mastofauna por meio de dados primários e secundários, totalizando em média, um número de registro de 61 (sessenta e um) espécies de mamíferos, onde as ordens mais representativas foram: Rodentia com 15 (quinze) espécies distribuídas em 07 (sete) famílias, Carnívora com 15 (quinze) espécies distribuídas em 04 (quatro) famílias e Chiroptera com 11 (onze) espécies distribuídas em 03 (três) famílias (Figuras 1 e 2).

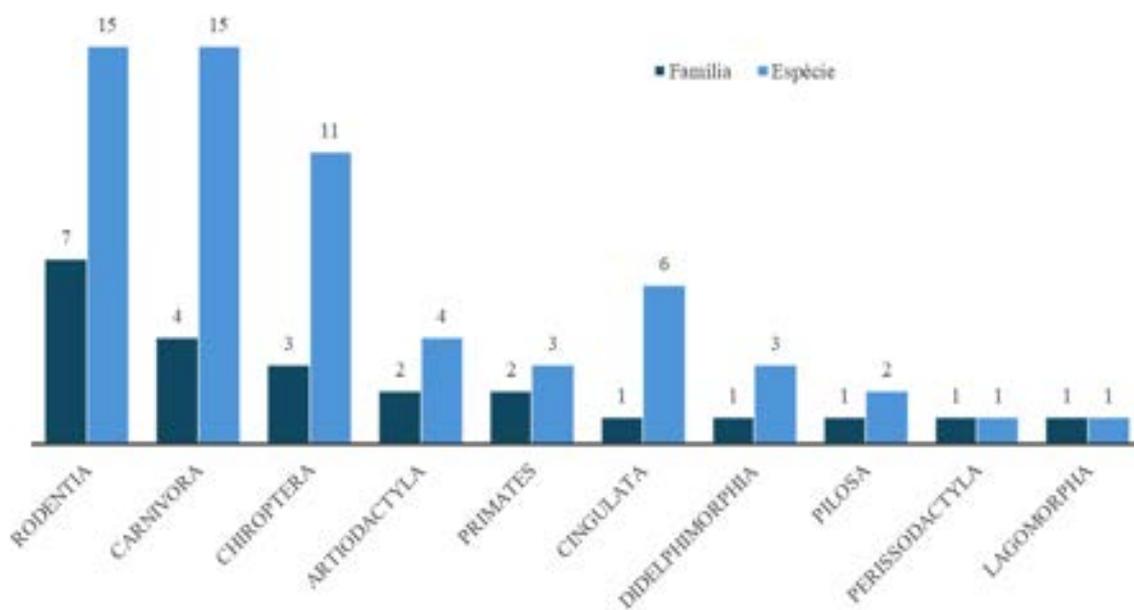
Do total de indivíduos listados, 06 (seis) estão na Lista de Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção na categoria vulnerável (VU): um da ordem Perissodactyla, o *Tapirus terrestris* (Linnaeus, 1758), um da ordem Cingulata, o *Tolypeutes tricinctus* (Linnaeus, 1758) (tatu-bola) e quatro da ordem Carnívora, o *Speothos venaticus* (Lund, 1842) (cachorro-do-mato-vinagre), *Leopardus pardalis* (Linnaeus, 1758), *Leopardus tigrinus* (Schreber, 1775) (gato-domato) e *Panthera onca* (Linnaeus, 1758) (onça-pintada) (MMA, 2018).

Figura 1 - Registro das ordens de mamíferos com seus respectivos números de famílias e espécie



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 2 - Número de famílias registradas por ordens de mamíferos



Fonte: Os Autores (2024).

Entre as espécies encontradas em abundância são: *Carollia perspicillata* (Linnaeus, 1758) (morcego) (Figura 3), o *Tolypeutes tricinctus* (Linnaeus, 1758) (tatu-bola) (Figura 4), *Subulo gouazoubira* Fischer, 1814 (veado-catingueiro) (Figuras 5), *Cavia aperea* Erxleben, 1777 (preá) (Figura 6), *Didelphis albiventris* lund 1840 (saruru/sariguê) (Figura 7) e *Dasyprocta azarae* Lichtenstein, 1823 (cutia) (Figura 8).

Figura 3 - *Carollia perspicillata* (morcego)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 4 - *Tolypeutes tricinctus* (tatu-bola)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 5 - *Subulo gouazoubira* (veado-catingueiro)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 6 - *Cavia aperea* (preá)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 7 - *Didelphis albiventris* (sarui/sariguê)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 8 - *Dasyprocta azarae* (cutia)



Fonte: Os Autores (2024).

Outras espécies consideradas raras, por não serem avistadas facilmente em todos os ambientes, também foram registradas neste bioma, nesta região do MATOPIBA: *Tamandua tetradactyla* (Linnaeus, 1758) (tamanduá-mirim) (Figura 9), *Myrmecophaga tridactyla* Linnaeus, 1758 (tamanduá-bandeira) (Figura 10), *Dasypus novemcinctus* (Linnaeus, 1758) (tatu-verdadeiro) (Figura 11) e *Callithrix penicillata* (sagui) (Figura 12).

Figura 9 - *Tamandua tetradactyla* (tamanduá-mirim)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 10 - *Myrmecophaga tridactyla* (tamanduá-bandeira)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 11 - *Dazypus novemcinctus* (tatu-verdadeiro)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 12 - *Callithrix penicillata* (sagui)



Fonte: Os Autores, 2024.

A ação antrópica neste bioma tem alterado significativamente a diversidade e composição das espécies, colocando os mamíferos entre os animais da fauna mais ameaçados de extinção. Estudos demonstram que a caça, mesmo a de sobrevivência, pode levar ao declínio e ao desaparecimento local de determinadas espécies animais. A diversidade encontrada na área de estudo, mesmo que em áreas preservadas, aponta para a necessidade da realização de estudos mais aprofundados, com o objetivo de conhecer a sua biogeografia para a preservação e realização de manejo adequado. Para tanto, se faz necessárias investigações mais profundas para que haja um monitoramento mais detalhado a fim de se estabelecer medidas de proteção e planos de manejo para esses táxons.

4.2.2 Aves

As aves compreendem o grupo de vertebrados mais facilmente reconhecível, dadas as suas características diagnósticas e o período de atividade, predominantemente diurno. Por serem relativamente bem conhecidas, especializadas por habitats e sensíveis a alterações dos biótopos preferidos, as aves são muito utilizadas como indicadores biológicos (Silva, 1998). Por exemplo, espécies típicas de vegetação arbórea são sensíveis ao desmatamento e apresentam declínios populacionais ou mesmo extinções locais após alterações do habitat (Willis; Oniki, 1992; Silva, 1998).

As aves são distinguidas pela sua alta capacidade de adaptação que permitiu com que habitassem os diversos tipos de ambientes no planeta. Como resultado, as aves constituem um dos grupos de animais mais diversificado, com quase 10 mil espécies podendo ser observadas ao redor do mundo. Dentro dessa biodiversidade, são reconhecidas 1.971 espécies de aves com ocorrência no Brasil (das quais 293 são endêmicas), desde espécies que habitam áreas florestadas e úmidas (Amazônia e Mata Atlântica), áreas com florestas secas (Cerrado e Caatinga) e áreas costeiras e oceânicas, (Pacheco *et al.*, 2021). Cerca de metade da avifauna brasileira ocorre no Cerrado, ou 856 espécies, o que se relaciona à enorme variedade de ambientes terrestres e aquáticos que compõem este bioma, assim como seu contato com outros quatro biomas do país (Gwynne *et al.*, 2010).

Ocupam vários tipos de ambientes por possuírem mecanismos eficientes de economia de água, homeotermia e capacidade de voar, o que garante a eficiência na dispersão. A participação das aves nas cadeias alimentares auxilia no controle da população de insetos, pequenos roedores e até serpentes. Elas podem ainda participar na polinização de flores de dispersão de sementes (Juniper; Parr, 1998), contribuindo assim para a manutenção e a restauração de áreas naturais (Kuhlmann, 2020).

A maioria das características morfológicas das aves estão direta ou indiretamente relacionadas às necessidades de voo, e muitos dos distintos aspectos do seu comportamento e da sua ecologia provêm da mobilidade que o voo proporciona (Almeida Júnior, 2022). A migração, por exemplo, é uma característica particular das aves, porque de todos os vertebrados terrestres, elas são as mais capacitadas a se deslocar por longas distâncias. É essa mobilidade que lhes permite explorar fontes de alimentos e locais de nidificação distribuídos no tempo e no espaço. Muitas delas migram por grandes distâncias, podendo permanecer em uma região somente por uma temporada, retornando todo ano aos mesmos locais de escalas e de reprodução, voltando em seguida ao seu habitat de origem. A maioria das migrações é consequência das mudanças sazonais que afetam a disponibilidade dos recursos (Silva, 1995).

Quanto ao comportamento ecológico das aves, a maioria utiliza sinais para realizarem o patrulhamento do território, sendo estes auditivos (canto) ou visuais (coloração de plumagem), indicando que muitas aves apresentam comportamento territorialista (Rodrigues, 2006). As aves costumam utilizar as árvores para nidificação, como poleiros de alimentação ou simplesmente para repouso. A destruição de parte da vegetação pode causar sérios problemas para uma população, devido à perda dos locais de escala migratória, nidificação e alimentação.

A perda de habitat é o principal fator para o declínio de muitas aves, além de outras causas, como a introdução de espécies predadoras ou competidoras, endogamia e outros processos relacionados ao tamanho populacional reduzido, perseguição humana para comércio e arte plumária, caça e coleta de ovos e filhotes e destruição das espécies de árvores utilizadas para

ninho (Juniper; Parr, 1998; Snyder *et al.*, 2000). Obviamente as alterações ambientais decorrentes desses processos trazem graves consequências para a avifauna original. *Sporophila maximiliani* (Cabanis, 1851) (bicudo), por exemplo, é um pássaro territorialista, que, nos períodos de acasalamento, não permite que outros pássaros adentrem pelos seus limites demarcados. Costuma viver em áreas isoladas próximas às regiões alagadiças, e possui um canto melodioso, sendo considerado um dos pássaros canoros mais famosos do Brasil. Devido à caça indiscriminada, os bicudos encontram-se ameaçados de extinção e só podem ser comercializados junto aos criadores que estejam legalmente registrados no IBAMA.

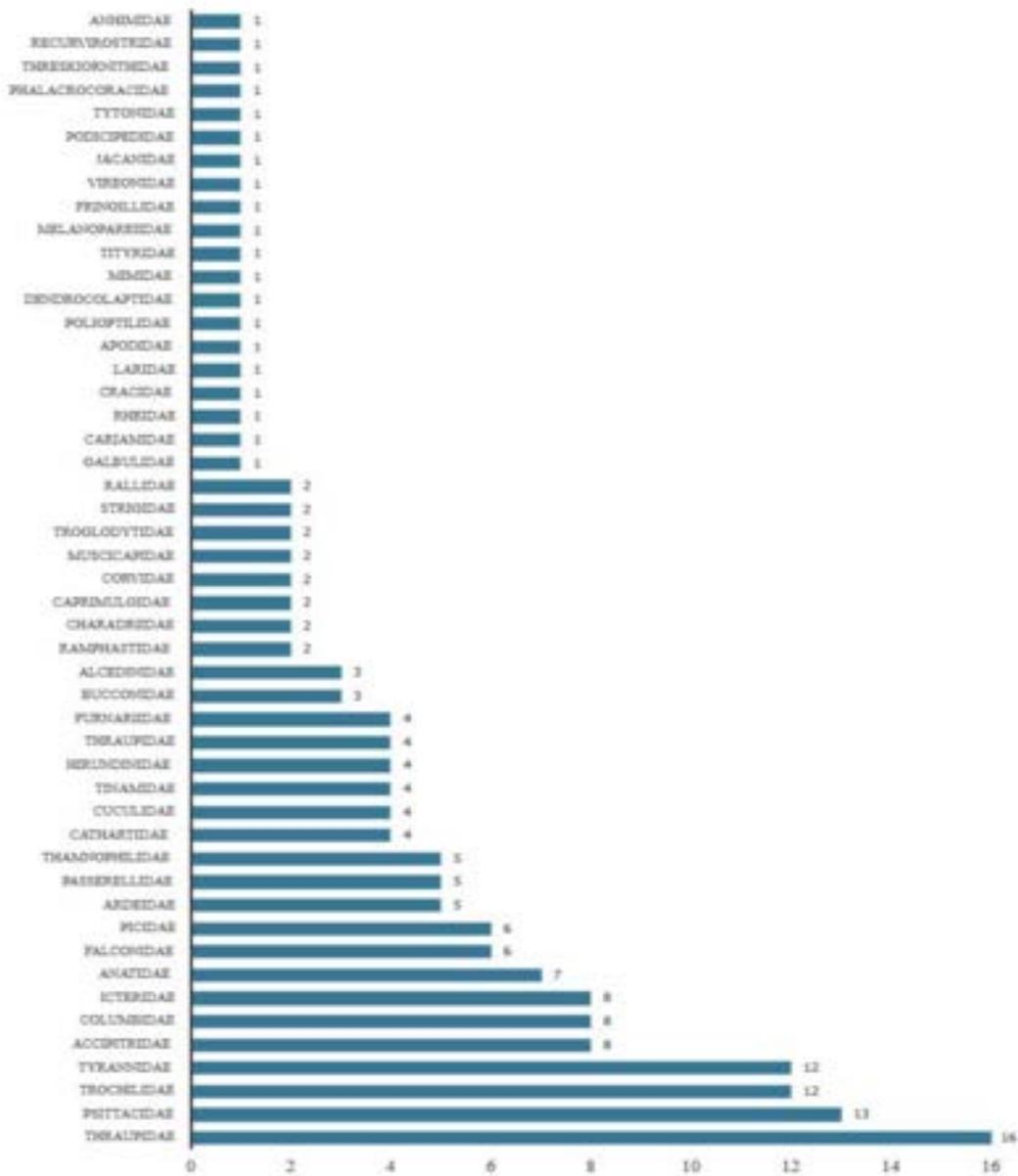
De acordo com Silva (1995), os ambientes florestais que compõem a paisagem da região do Cerrado são elementos chave para a manutenção da diversidade de aves encontrada neste bioma. Segundo Silva (*op. cit.*), 51,8% das espécies que nidificam no Cerrado são consideradas dependentes das formações florestais, enquanto 20,8% são semi-dependentes.

Entender como as características biogeográficas e da história de vida das espécies influenciam no risco de extinção é um ponto chave para a conservação biológica, uma vez que existe uma quantidade enorme de exemplos de extinções relacionadas a estas características (Quammen, 1996). Certas espécies de aves possuem uma série de características normalmente associadas ao risco de extinção, como grande tamanho corporal, pequena diversidade de itens alimentares, alta especificidade de habitat, pequena taxa de crescimento populacional e distribuição geográfica restrita.

Estudos (Machado, 2000) indicam perdas de até 25% das espécies de aves associadas com a mata de galeria apenas se houver a destruição dos ambientes naturais vizinhos à mata, mesmo que ela permaneça intocada. Outras pesquisas mostram que a redução excessiva das áreas nativas provoca a extinção de espécies de aves, que desaparecem dos fragmentos de pequena dimensão (Hass, 2002). *Athene cunicularia* (Molina, 1782) (coruja-buraqueira), por exemplo, vive em lugares sossegados e representa importante elo em cadeias alimentares, pois é predador de pequenos roedores, répteis, anfíbios, pequenos insetos, escorpiões e pequenos pássaros como o *Passer domesticus* (Linnaeus, 1758) (pardal). Por se alimentar de insetos, é muito útil ao homem, beneficiando-o na agricultura. São aves principalmente crepusculares, andando sem destino enquanto caçam e, após pegar sua presa, se deslocam para um poleiro de alimentação. Possuem uma visão 100 vezes mais penetrante que a visão humana e uma ótima audição. Tem voo suave e silencioso.

Através do Método denominado Rapid Assessment Project - RAP (Parker; Carr, 1992; Foster *et al.*, 1994), levantamentos e inventários conduzidos em diferentes áreas de Cerrado no MATOPIBA, identificou-se a ampla ocorrência das espécies da avifauna por meio de dados primários e secundários, totalizando em média, um número de registro de 177 (cento e setenta e sete) espécies de aves, pertencentes a 49 (quarenta e nove) famílias e 23 (vinte e três) ordens. As famílias mais representativas foram Thraupidae com 16 (dezesesseis) espécies, Psittacidae com 13 (treze) espécies, Trochilidae e Tyrannidae com 12 (doze) espécies cada, e as famílias Accipitridae, Columbidae e Icteridae com 08 (oito) espécies cada (Figuras 13 e 14).

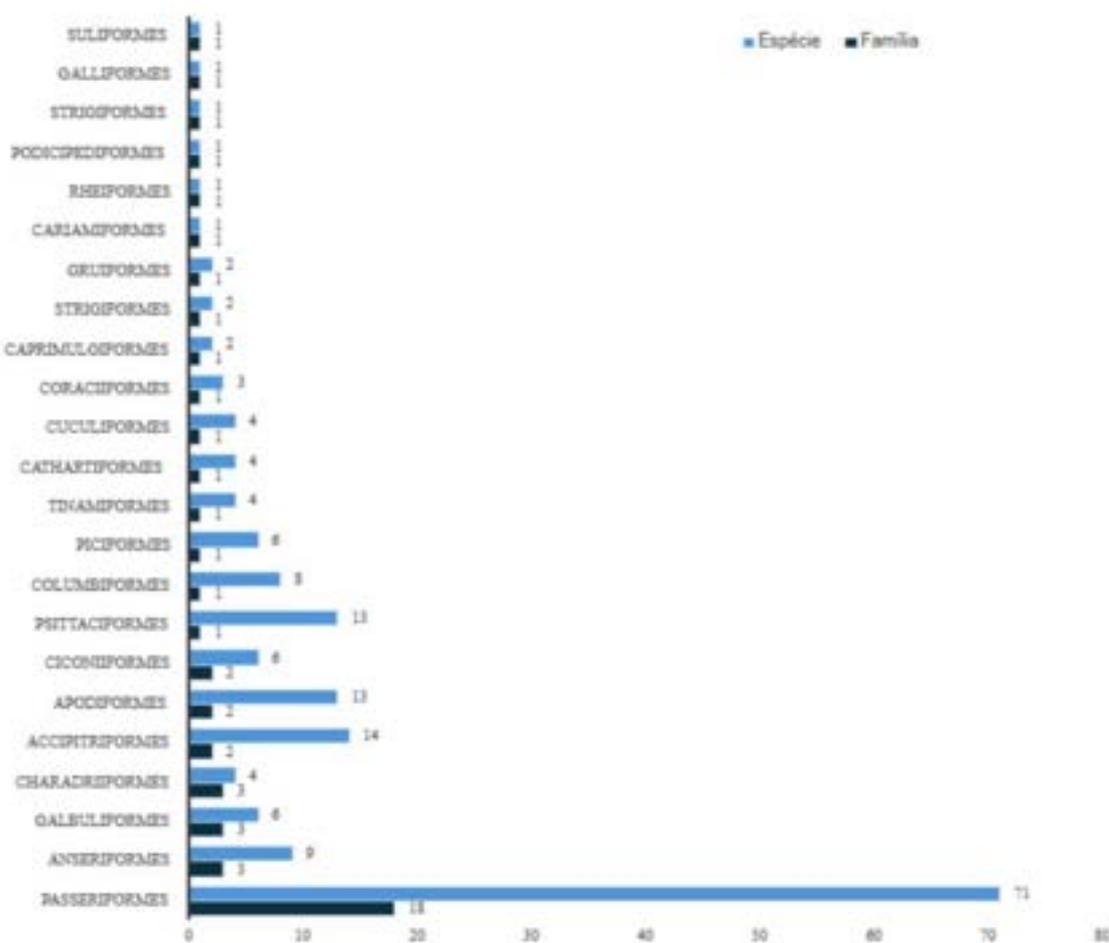
Figura 13 - Número de espécies registradas por família de aves



Fonte: Os Autores (2024).

Este estudo registrou cerca de 20,7% das 856 (oitocentos e cinquenta e seis) espécies de aves que são indicadas para o bioma cerrado (Silva, 1995), riqueza menor que a registrada em trabalhos das distintas regiões do cerrado, tais como o trabalho de Carvalhaes (2001), na Chapada Diamantina, com 43,1% das aves pertencentes ao cerrado e riqueza maior ao levantamento de Machado (2003) com 15,4% desse total. Machado (*op cit.*) afirma que os fatores que determinaram nos resultados, referentes à baixa riqueza, estão relacionados com a metodologia empregada, bem como o esforço amostral.

Figura 14 - Registro das ordens de aves com seus respectivos números de famílias e espécies



Fonte: Os Autores (2024).

As espécies de aves mais visualizadas foram *Neothraupis fasciata* (Linchtenstein, 1823) (cigarra-do-cerrado) (Figura 15), *Schistochlamys ruficapillus* (Vieillot, 1817), (bico-de-veludo) (Figura 16), *Eupsittula cactorum* (Kuhl, 1820) (periquito-da-caatinga) (Figura 17), *Eupsittula aurea* Gmelin, 1788 (periquito-rei) (Figura 18), *Saltatricola atricollis* Vieillot, 1817 (batuqueiro) (Figura 19), *Athene cunicularia* Molina, 1782 (corujinha-buraqueira) (Figura 20), *Caracara plancus* Miller, 1777 (gavião-carcará) (Figura 21), *Guira guira* Gmelin, 1788 (anu-branco) (Figura 22), *Tyrannus melancholicus* Vieillot, 1819 (Figura 23) (suirirí), *Crotophaga ani* Linnaeus, 1758 (anu-preto) (Figura 24), além das espécies *Rhea americana* Linnaeus, 1758 (ema), *Picumnus pygmaeus* (Linchtenstein, 1823) (pica-pau-anão-pintado), *Coereba flaveola* Linnaeus, 1758 (cambacica) e *Eupetomena macroura* Gmelin, 1788 (beija-flor-tesoura), *Camptostoma obsoletum* (Temminck, 1824) (risadinha), *Buteo albonotatus* Kaup, 1847 (gavião-preto), *Daptrius chimachima* (carrapateiro), *Mimus saturninus* (Linchtenstein, 1823) (sabiá-do-campo), *Gnorimopsar chopi* Vieillot, 1819 (pássaro-preto), *Icterus jamacaii* (Gmelin, 1788) (sofrê), *Nengetus cinereus* (Vieillot, 1816) (primavera), *Sporophila nigricollis* (Vieillot, 1823) (baiano/papa-capim), *Falco sparverius* Linnaeus, 1758 (quiriquiri), *Egretta thula*

(Molina, 1782) (garça-branca-pequena), *Gallinula galeata* (Linchtenstein, 1818) (frango d'água), *Podilymbus podiceps* (Linnaeus, 1758) (pato-mergulhão-caçador), e *Tachycineta albiventer* (Boddaert, 1783) (andorinha), *Melanerpes candidus* (Otto, 1796) (pica-pau-branco), *Colaptes campestris* (Vieillot, 1818) (pica-pau-do-campo), dentre outras.

Figura 15 - *Neothraupis fasciata* (tiê-do-cerrado)



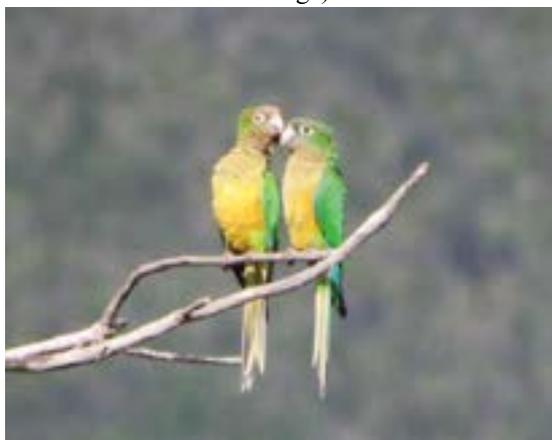
Fonte: Os Autores (2024).

Figura 16 - *Schistochlamys ruficapillus* (bico-de-veludo)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 17 - *Eupsittula cactorum* (periquito-da-caatinga)



Fonte: Os Autores, 2024.

Figura 18 - *Eupsittula aurea* (periquito-rei)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 19 - *Saltatricula atricollis* (batuqueiro)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 20 - *Athene cunicularia* (corujinha-buraqueira)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 21 - *Caracara plancus* (gavião-carcará)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 22 - *Guira guira* (anu-branco)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 23 - *Tyrannus melancholicus* (suiriri)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 24 - *Crotophaga ani* (anu-preto)



Fonte: Os Autores (2024).

A família Thraupidae Bonaparte, 1853, a mais representativa neste estudo, se trata de uma grande família, que inclui vasta quantidade de gêneros e espécies de pássaros granívoros e alguns dos melhores pássaros canoros deste continente. Em geral apresentam plumagens de tons apagados, embora frequentemente apresentem padrões contrastantes de marcas claras e escuras. Algumas das espécies mais visualizadas desta família foram *Paroaria dominicana* (Linnaeus, 1758) (cardeal-do-nordeste) (Figura 25), *Volatinia jacarina* (Linnaeus, 1766) (tiziú) (Figura 26), *Thraupis sayaca* (Linnaeus, 1766) (sanhaço) e, *Schistochlamys ruficapillus* (Vieillot, 1817) (bico-de-veludo).

Figura 25 - *Paroaria dominicana* (cardeal)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 26 - *Volatinia jacarina* (tiziú)



Fonte: Os Autores (2024).

A família Columbidae Leach, 1820, está representada pelas pombas e rolinhas, que apresentam morfologia bastante uniforme com cores modestas. Ocupam praticamente todos os biomas do país se alimentando de grãos, sementes e frutos. Sendo bastante comum em todas as áreas levantadas, os representantes desta família apareciam sempre em grande abundância. Alguns dos seus representantes: *Columbina picui* (Temminck, 1813) (rolinha-picui) (Figura 27), *Columbina squammata* (Lesson, 1831) (rolinha-fogo-apagou) (Figura 28), *Columbina talpacoti* (Temminck, 1811) (rolinha-caldo-de-feijão) e, *Zenaida auriculata* (Des Murs, 1847) (pomba-de-bando).

Figura 27 - *Columbina picui* (rolinha-picui)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 28 - *Columbina squammata* (rolinha-fogo-apagou)



Fonte: Os Autores (2024).

Muitas espécies foram registradas como raras, com poucos indivíduos visualizados. Dentre eles destaca-se: *Ara ararauna* Linnaeus, 1758 (arara-canindé) (Figura 29), *Anodorhynchus hyacinthinus* Latham, 1790 (arara-azul) (Figura 30), *Piranga flava* Vieillot, 1822 (sanhaço-de-fogo) (Figura 31), *Sarcoramphus papa* (Lineu, 1758) (urubu-rei) (Figura 32), *Crypturellus parvirostris* (Wagler, 1827) (inhabú-chororó), *Lepidocolaptes angustirostris* Vieillot, 1818 (arapaçu-do-cerrado), *Colonia colonus* (Vieillot, 1818) (viuvinha), *Arundinicola leucocephala* (Linnaeus, 1764) (feirinha) (Figura 33), *Stilpnia cayana* (Linnaeus, 1766) (saíra-amarela), *Nystalus chacuru* (Vieillot, 1816) (joão-bobo) (Figura 34), *Ortalis guttata* (Spix, 1825) (aracuã), *Melanopareia torquata* Wied, 1831 (meia-lua-do-cerrado) (Figura 35), *Galbula ruficauda* Cuvier, 1816 (ariramba-de-cauda-ruiva) (Figura 36) e *Piaya cayana* Linnaeus, 1766 (alma-de-gato) (Figura 37) e *Sicalis flaveola* (Linnaeus, 1766) (canário-da-terra) (Figura 38).

Figura 29 - *Ara ararauna* (arara-canindé)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 30 - *Anodorhynchus hyacinthinus* (arara-azul)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 31 - *Piranga flava* (sanhaço-de-fogo)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 32 - *Sarcoramphus papa* (urubu-rei)



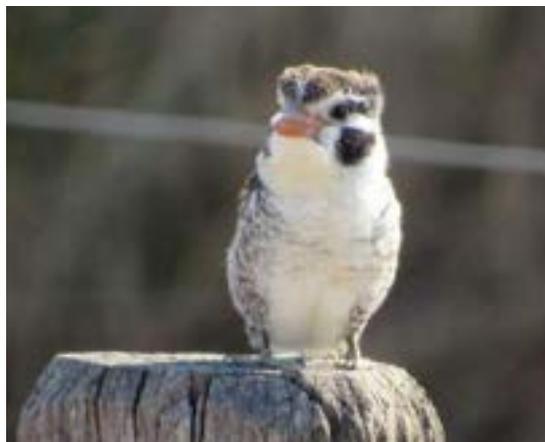
Fonte: Os Autores (2024).

Figura 33 - *Arundinicola leucocephala* (freirinha)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 34 - *Nystalus chacuru* (joão-bobo)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 35 - *Melanopareia torquata* (meia-lua-do-cerrado)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 36 - *Galbula ruficauda* (ariramba-de-cauda-ruiva)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 37 - *Piaya cayana* (alma-de-gato)



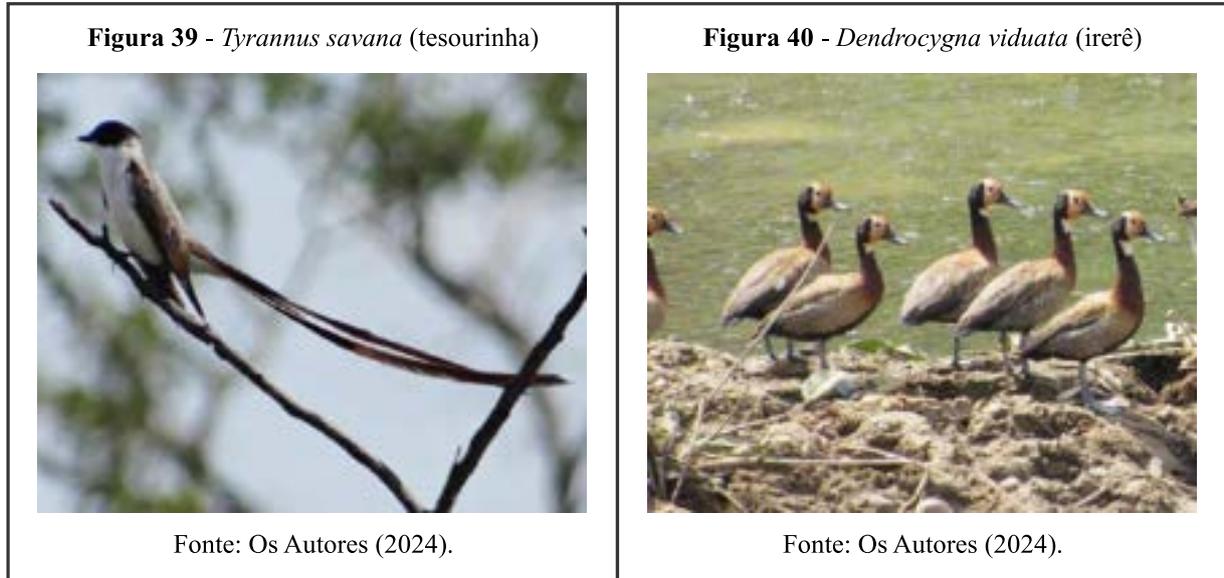
Fonte: Os Autores (2024).

Figura 38 - *Sicalis flaveola* (canário-da-terra)



Fonte: Os Autores (2024).

A espécie migratória *Tyrannus savanna* Daudin, 1802 (tesourinha) (Figura 39) foi registrada na área de estudo, onde foi vista com frequência somente no período chuvoso. A *Dendrocygna viduata* (Linnaeus, 1766) (irerê) (Figura 40), realiza migração sazonal, é uma ave de ampla ocorrência em vários biomas no Brasil. Fora do país, os irerês ocorrem na América do Sul e Central, chegando até a África.



4.2.3 Répteis

Os répteis formam um grupo de animais com hábitos e comportamentos diversos bem peculiares, englobando diferentes grupos animais das ordens *Crocodylia*, *Testudines* e *Squamata*. Atualmente, são conhecidas para o Brasil 848 espécies, sendo 6 espécies de crocodilianos, 38 *testudines* e 804 *squamatas* (82 *anfísbenas*, 292 lagartos e 430 serpentes) (Costa *et al.*, 2021). Foram os primeiros vertebrados verdadeiramente terrestres, de onde foram originados, e atualmente ocupam tanto ambientes secos, quanto terrestres úmidos ou aquáticos (marinhos e água doce) (Orr, 1996).

A palavra réptil vem do latim *reptare*, cujo significado é rastejar, e está diretamente associada à forma de locomoção desses animais. Representantes desse táxon apresentam características em comum, como a dependência da temperatura do ambiente para regulação térmica e para determinação sexual dos filhotes (com a exceção de alguns *Testudines*), possuem hábitos carnívoros, respiração pulmonar, o corpo coberto por pele seca, sem glândulas e impermeável, podendo ser coberto por escamas, carapaças ou placas e o coração com 3 cavidades (2 átrios e 1 ventrículo), com exceção dos crocodilianos. No geral, o grupo apresenta grande variação de espécies, ocupação de habitats e formas de reprodução (Almeida Júnior, 2022).

Os Crocodilianos habitam estuários de água doce e salobra, rios e áreas alagadas nas regiões tropicais e subtropicais, apresentando vasta diversidade de aspectos morfológicos e biológicos (Pincheira-Donoso. *et al.*, 2013). São considerados exímios predadores aquáticos e

apresentam comportamento social complexo (Rueda-Almoacid *et al.*, 2007). Apresentam espécies sensíveis a alterações ambientais, notadamente à destruição de hábitat.

Esse grupo vem sendo bastante explorado pelas populações humanas com diversas finalidades, sendo elas: recurso alimentar, produtos medicinais, uso do couro e ainda caça por retaliação (Ross, 1998; Verdade, 2004; Verdade; Larriera *et al.*, 2010; Combrink *et al.*, 2013). O Brasil está entre os países com a maior riqueza de crocodilianos do mundo ao lado da Colômbia e atualmente nenhuma das espécies brasileiras é considerada ameaçada de extinção (Costa *et al.*, 2021). Porém a caça, perda e fragmentação de habitats tem causado grandes alterações no comportamento, padrões de movimentação e dinâmica populacional das espécies (Yves *et al.*, 2018).

Os Testudines (tartarugas, cágados e jabutis), mostram especializações morfológicas associadas a habitats terrestres, de água doce e marinha. São facilmente reconhecíveis por suas características morfológicas externas, por possuírem casco externo completo, formado por uma carapaça com escudos cervicais, vertebrais, pleurais e marginais e por plastrão (estrutura localizada na parte ventral do corpo) (Gaffney, 1984).

As baixas taxas de crescimento e os longos períodos necessários para que atinjam a maturidade são características dos Testudines em geral, e, particularmente, das espécies de grande porte. Além disso, são animais de vida longa, o que geralmente está associado a uma baixa taxa de substituição de indivíduos na população, característica que pode levar ao risco de extinção, devido à redução do número de indivíduos pela caça ou destruição de habitats (Pough *et al.*, 2003).

Atualmente, 20% da fauna mundial de Testudines é formada por espécies da subordem Pleurodira (que contém as espécies que retraem a cabeça para o interior da carapaça) e 80% da subordem Cryptodira (aquelas que fazem a retração lateral do pescoço) (Joyce *et al.*, 2004). Popularmente, as tartarugas são os Testudines que vivem no mar, os cágados são os indivíduos de água doce e os jabutis são os animais terrestres, e o que os diferencia, além do habitat em que vivem, são características morfológicas específicas das patas, casco e pescoço. Todas as espécies do grupo são ovíparas e seus ovos são depositados em ninhos escavados no solo ou na areia (Jared *et al.*, 2016).

Os lagartos, serpentes e anfisbenas, estão classificados na ordem Squamata e habitam todos os tipos de ambientes, terrestres e aquáticos, estando distribuídos em todos os continentes (Conrad, 2008). Características como órgão copulatório pareado (hemipênis), escamas e língua bifurcada são alguns dos caracteres compartilhados por todos os indivíduos deste táxon (Rieppel, 1988).

Em se tratando de serpentes e lagartos, os métodos que estes utilizam para encontrar, capturar, subjugar e engolir as presas são diversificados e importantes na determinação das interações entre espécies de uma comunidade. Especializações como serpentes quase desprovidas de dentes, que engolem ovos de aves intactos ou camaleões que projetam a língua para capturar insetos, são apenas uma amostra da diversidade de especializações alimentares desses indivíduos (Pough *et al.*, 2003). A grande maioria dos escamados é ovípara, porém existem também as espécies vivíparas, como as serpentes do gênero *Bothrops* (Nunes, 2008; Silva *et al.*, 2013).

Cerca de 70 espécies de serpentes são peçonhentas e potencialmente perigosas aos humanos, pois podem causar acidentes ofídicos (Sebben, *et al.*, 1996). A constrição e o veneno são especializações predatórias que permitem que uma serpente segure presas grandes, como alguns roedores, com pouco risco de ferimento. Componentes de venenos de serpentes apresentam substâncias cujos princípios ativos são usados na indústria farmacêutica, no combate à hipertensão arterial (Ferreira *et al.*, 1970).

Para Freitas e Silva (2007) *Crotalus durissus cascavella* Wangler, 1824 (cascavel), por exemplo, são serpentes perigosas, mas não agressivas, fugindo rapidamente quando avistadas. Diferente de seus parentes da América do Norte, que possuem em seus venenos propriedade necrosante, a cascavel nativa do cerrado possui veneno que atua no sistema nervoso, fazendo com que a vítima tenha dificuldades de locomoção e respiração. Possui um chocalho na extremidade da cauda, facilitando seu reconhecimento. Ao contrário do que muitos acreditam, o número de anéis no chocalho da cascavel, não representa sua idade, mas a mudança de pele, que ocorre de 2 a 4 vezes por ano, e acrescenta um novo anel no chocalho. Alimentam-se de pequenos roedores.

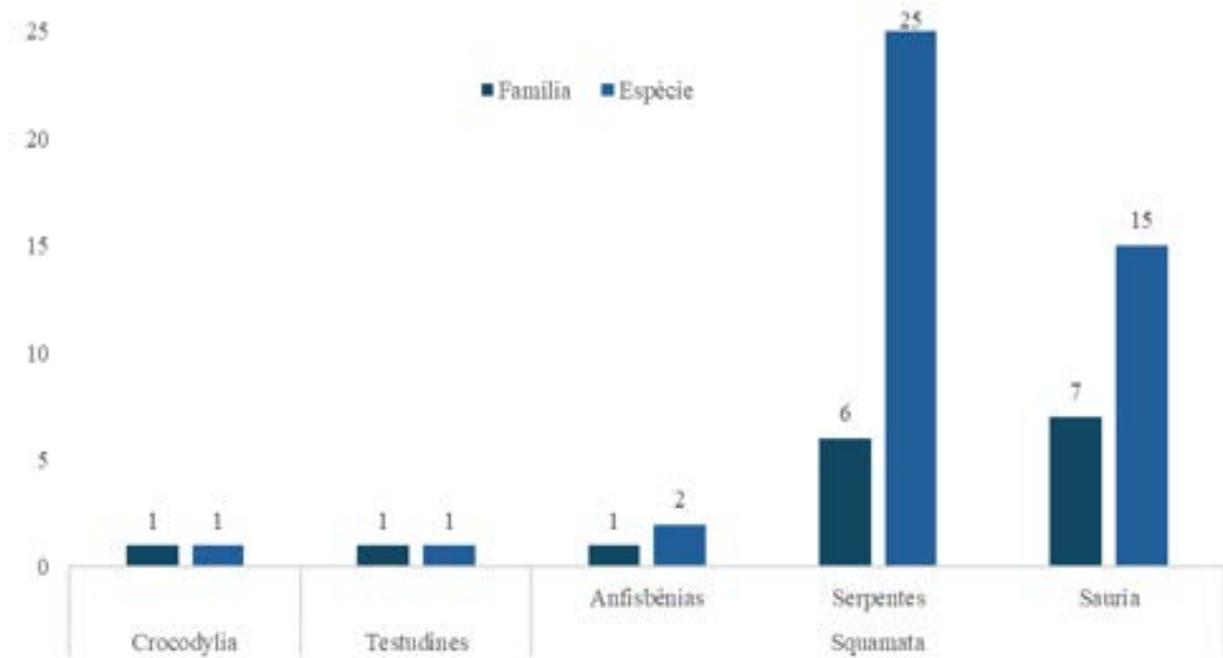
Entretanto, a maioria das espécies de serpentes não é venenosa. De acordo com Freitas (2003), *Boa constrictor* Linnaeus, 1758 (jibóia), por exemplo, não possui veneno e raramente passa de 3 metros de comprimento. Suas presas são principalmente aves, pequenos mamíferos e lagartos grandes. A jibóia surpreende suas vítimas ficando à espreita, silenciosamente. Enrosca-se em torno delas e contrai o corpo até que a presa não consiga respirar e morra sufocada. Em seguida, engole a vítima começando pela cabeça e a digere devagar, caindo num torpor que dura às vezes, várias semanas. Despende pouca energia e pode ficar muito tempo sem comer. Passa a maior parte do tempo nas árvores. Quando ameaçada foge muito lentamente. Emite um silvo alto na tentativa de assustar o inimigo. Já os padrões de atividade dos lagartos variam de espécies extremamente sedentárias, que passam horas em um determinado local, movimentando-se apenas para capturar insetos para sua alimentação ou para afugentar outros lagartos, até espécies que estão quase em constante movimento (Pough *et al.*, 2003). As características ecológicas, morfológicas e comportamentais correlacionadas ao modo de forrageio de diferentes espécies de lagartos e serpentes definem muitos aspectos da biologia desses animais (Huey; Pianka, 1981). Espécies de que se alimentam de diferentes tipos de presas são vítimas de diferentes tipos de predadores e apresentam sistemas sociais diferentes.

Os forrageadores sedentários permanecem em um local fixo, de onde podem perscrutar uma vasta área. Imóveis, detectam o movimento de um inseto visualmente e o capturam com um ataque rápido. Os forrageadores ativos passam a maior parte do tempo, na superfície do substrato, movendo-se e introduzindo o focinho sob folhas caídas e fendas do solo (Pough *et al.*, 2003). As serpentes e lagartos vivem em microhabitats de preferência embaixo de pedras, sob troncos e dentro de tocas.

A diversidade de ambientes do Cerrado influencia diretamente na riqueza e distribuição local da herpetofauna, devido à heterogeneidade de habitats muitas vezes contrastantes e contíguos, proporciona condições variadas de recursos que podem ser exploradas por um grande número de anfíbios e répteis (Bastos, 2007). Apesar dos impactos que o Cerrado vem sofrendo, este apresenta a maior proporção de endemismos entre os Tetrápodes, sendo que o último grande inventário contabilizou 267 espécies de répteis Squamata, e destas 103 são endêmicas (Machado *et al.* 2004, Nogueira *et al.* 2011).

Levantamento e inventários conduzidos em diferentes áreas de Cerrado no MATOPIBA, identificou-se, através do Método denominado *Rapid Assessment Project* - RAP (Parker; Carr, 1992; Foster *et al.*, 1994), a ampla ocorrência das espécies da herpetofauna (répteis) por meio de dados primários e secundários, totalizando em média, um número de registro de 44 (quarenta e quatro) espécies de répteis dividido em 03 ordens (Crocodylia, Testudines e Squamata) e distribuídas em 16 (dezesesseis) famílias (Figura 41).

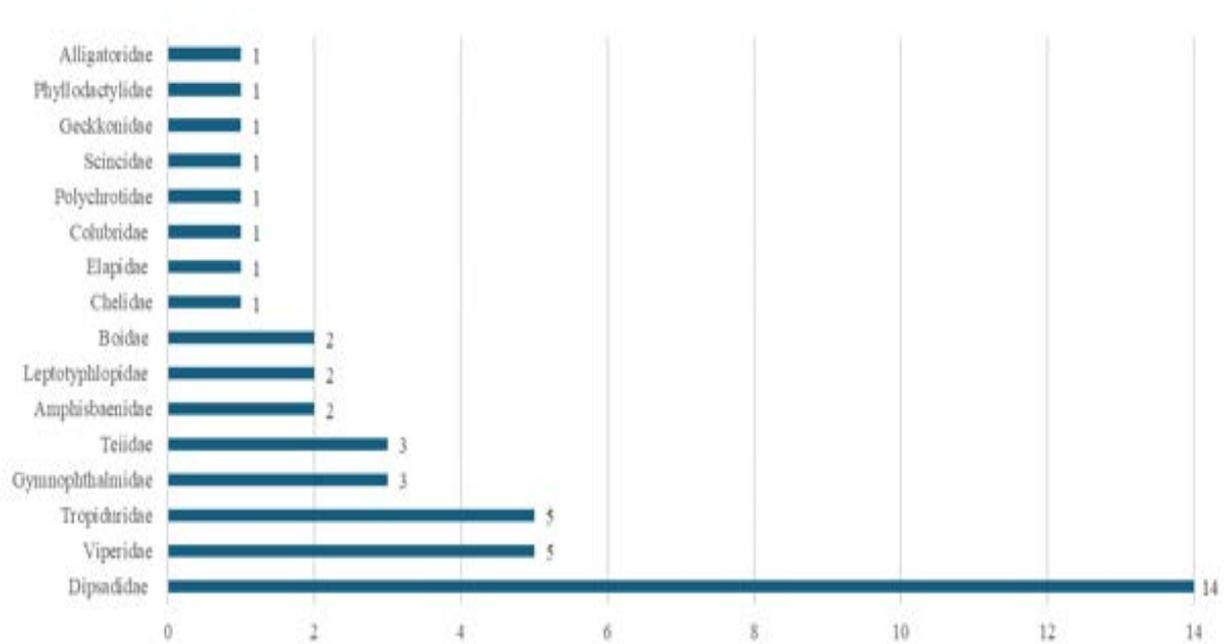
Figura 41 - Registro das ordens de répteis com seus respectivos números de famílias e espécies



Fonte: Os Autores (2024).

A família mais representativa foi a Dipsadidae com 14 (quatorze) espécies de serpentes, seguida pela Viperidae com 05 (cinco) espécies de serpente e a Tropiduridae com 05 (cinco) espécies de lagartos (Figura 42). Os lagartos *Cnemidophorus ocellifera* (Spix, 1825) e *Tropidurus torquatus* (Wied-Neuwied, 1820) e as serpentes *Oxybelis aeneus* Wagler, 1824, *Crotalus durissus cascavella* Wangler, 1824 (cascavel), *Boa constrictor* Linnaeus, 1758 (jiboia) e *Bothrops jararaca* (Wied, 1824) (jararaca), foram as espécies mais encontradas na área de estudo.

Figura 42 - Número espécies registradas por família de répteis



Fonte: Os Autores (2024).

Registrou-se 15 (quinze) espécies de lagartos, representando 34% da herpetofauna local. Dentre as famílias mais representativas de lagartos na área de estudo, estão a Tropiduridae (11%), Gymnophthalmidae (7%) e Teiidae (7%). As demais famílias apresentaram duas espécies (família Leptotyphlopidae) ou apenas uma espécie (famílias Polychrotidae, Scincidae e Gekkonidae).

A família Tropiduridae abriga diversos gêneros, amplamente distribuídos pela América do Sul e Central. Caracterizada por hábitos territorialistas, são exímios caçadores. A espécie *Tropidurus torquatus* (Wied-Neuwied, 1820) (Figura 43), por exemplo, é uma espécie que pode alcançar 20 cm de comprimento total, caracterizada por apresentar virilha com dobra bem-marcada, preenchida por grânulos muito pequenos, lados do pescoço com uma prega alojando duas bolsas de acarinós rasas e também preenchida por grânulos. A região axial apresenta duas a três áreas com escamas granulares, separadas entre si por espaços revestidos de escamas muito maiores (Rodrigues, 1987). O macho adulto com mancha negra na aba anal e porção ventral da coxa. Já a espécie *Tropidurus hispidus* (Spix, 1825) é a maior espécie do gênero, podendo alcançar 32 cm de comprimento total. Possui um colorido de fundo cinza claro ou muito escuro. Os machos apresentam manchas negras nas porções ventrais das coxas e aba anal. Não possuem bolsas de acarinós na região da virilha; lados do pescoço com uma bolsa, além de uma bolsa de acarinó na axila revestida por grânulos e marginada anterior e posteriormente por escamas maiores (Rodrigues, *op. cit.*).

A família Teiidae está representada por lagartos de tamanhos variados, alguns podendo atingir 1,4 metros de comprimento e pesar até 4 quilos (Freitas; Silva, 2007) a exemplo do *Salvator merianae* AM. C. Duméril & Bibron, 1839 (teiú) (Figura 44). São extremamente ágeis, tanto para o forrageio de insetos e pequenos vertebrados, quanto para a fuga quando se sentem ameaçados. A característica mais marcante em sua anatomia é o corpo comprido e a cabeça afilada.

A espécie *Ameivula ocellifera* (Spix, 1825) (Figura 45), foi a espécie encontrada em maior abundância, facilmente visualizada. Trata-se de uma espécie de pequeno porte, podendo alcançar mais de 20 cm de comprimento. O colorido de fundo é o verde ou marrom-claro, com linhas longitudinais pontilhadas e intercaladas de tons claros seguindo pelo dorso e cauda. O *Ameiva ameiva* (Linnaeus, 1758) (Figura 46) é um lagarto heliófilo que apresenta ampla distribuição geográfica na América Central e do Sul (Pianka; Vitt, 2003), é bastante ativo e se alimenta de grande variedade de presas, incluindo artrópodes e pequenos vertebrados. Ocorre em diferentes tipos de habitats, desde áreas abertas até as florestadas

Caracterizada por apresentar lagartos de pequeno e médio porte exclusivamente arborícolas, a família Polychrotidae, representada pelo *Polychrus acutirostris* Spix, 1825 (papavento-cinza) (Figura 47), apresenta corpo comprido e cauda longa. De hábito lento, esta espécie é constantemente visualizada no cerrado.

Integrantes da família Scincidae, como é o caso da *Copeoglossum nigropunctatum* Spix, 1825 (bribo-brilhante) (Figura 48), são de hábitos terrestres, diurnos extremamente ágeis, nutrem-se de insetos e apresentam o corpo com escamas de aspecto brilhante. É uma espécie grande do gênero, podendo alcançar 15 cm de comprimento total. É típica dos cerrados do Brasil Central.

A família Gymnophthalmidae é caracterizada por lagartos de porte muito pequeno que podem apresentar pálpebras móveis ou não. São espécies tipicamente terrestres que vivem no folhicho da mata, sobre ou sob o solo, bem como as espécies que vivem em solos arenosos. A espécie *Nothobachia ablephara* Rodrigues, 1984, atinge cerca de 11 cm de comprimento total. Possui vestígios de pernas dianteiras e pernas traseiras. O colorido é cor de areia e cinza no dorso com os flancos mais escuros e tons cinzentos.

Figura 43 - *Tropidurus torquatus* (calango)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 44 - *Salvator merianae* (teiú)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 45 - *Ameivula ocellifera* (calanguinho-listrado)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 46 - *Ameiva ameiva* (calango-verde)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 47 - *Polychrus acutirostris* (papa-vento-cinza)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 48 - *Copeoglossum nigropunctatum* (bibra-brilhante)



Fonte: Os Autores (2024).

Foram registradas 25 espécies da ofiofauna, 57% da herpetofauna local, representada por cinco das nove famílias de serpentes que ocorrem no país, incluindo uma de hábito fossório (Leptotyphlopidae). Embora registrada até o momento somente por meio de dados da literatura, a família Leptotyphlopidae tem uma ampla distribuição pelo globo, e é representada por espécies, que dificilmente ultrapassam 20 cm de comprimento. Alimentam-se basicamente de cupins e não apresentam peçonha.

A família Colubridae Oppel, 1811, é a maior família de serpentes do mundo, com mais de 1.000 espécies e ampla distribuição. Seus hábitos são variados e apresentam dois tipos de dentição, áglifa (espécies não peçonhentas) e opistóglifas (espécies peçonhentas). Alimentam-se basicamente de pequenos invertebrados e vertebrados. Tanto a coloração quanto o porte

variam muito, podendo ter espécies que ultrapassam três metros de comprimento. Neste estudo, a família Columbridae é a mais representativa, com 66,7% das espécies de serpentes registradas.

Da família Dipsadidae Bonaparte, 1840, a cobra coral-falsa *Oxyrhopus rhombifer* Duméril, Bibron e Duméril, 1854 (Figura 49), é uma espécie típica de cerrado e campos que atinge cerca de 70 cm de comprimento total. Apresenta padrão de corais-falsas, com colorido contrastante de vermelho-rosado, preto e branco.

A *Philodryas olfersii* Lichtenstein, 1823 (cobra-verde) (Figura 50) tem preferência por áreas abertas com vegetação baixa e dentição opistóglifa, esta espécie alimenta-se de rãs, lagartos, aves e roedores. Possui coloração predominante verde-escuro no dorso e mais claro no ventre, podendo atingir 1,4 m de comprimento.

A família Viperidae Laurenti, 1768, caracteriza-se por apresentar dentição solenóglifa, considerado o melhor tipo de dentição para inoculação de peçonha. Animais de hábitos na maioria terrestres apresentam ampla distribuição e alimentam-se de pequenos vertebrados.

A *Crotalus durissus cascavella* Linnaeus, 1758, (cascavel) (Figura 51) é uma serpente de porte mediano, pode alcançar 1,6 metros de comprimento total. Apresenta um colorido de fundo predominantemente marrom escuro ou cinza, com losangos longitudinais de cores escuras envolvidos com cor creme ou branco. Sua principal característica é a presença de um chocalho na cauda. É uma espécie crepuscular, noturna e peçonhenta que pode causar muitos acidentes. Devido a esse fato, é uma espécie que é constantemente atacada por moradores da região, que costumam matar todos os indivíduos que encontram.

A família Elapidae tem uma ampla distribuição pelo globo e caracteriza-se por possuir dentição do tipo proteróglifa, com a peçonha mais forte e letal entre todas as serpentes conhecidas no mundo. No Brasil, as espécies desta família geralmente apresentam coloridos de cores tríades completas pelo corpo de cores aposemáticas (contrastantes) em tons de amarelo, branco, preto e vermelho com disposição bem variada. São semi-fossórias e alimentam-se de pequenas serpentes e anfíbios (Freitas; Silva, 2007).

A família Boidae apresenta distribuição mundial, sendo encontrada nas Américas, Índia, África Central, sul da Ásia e ilhas do Pacífico Sul. Entre os representantes dessa família, a espécie *Boa constrictor* Linnaeus, 1758 (jibóia) (Figura 52) é encontrada desde o México até o norte da Argentina, sendo amplamente distribuída no Brasil. Alimenta-se de pequenos mamíferos, aves e lagartos e caracteriza-se por hábitos diurnos, noturnos e por ter como habitat áreas de cerrado e caatinga (Zug *et al.*, 2001).

Quanto ao risco que as serpentes podem representar para a população local, observa-se que a maioria das espécies registradas neste trabalho, como em muitos outros trabalhos, (Borges, 1991; Argôlo, 2000; Argôlo, 2004; Freitas & Silva, 2007), são de espécies não peçonhentas ou que não causam grandes perigos para a população, por se tratar de espécies pouco agressivas, ou mesmo inofensivas, como é o caso das falsas-corais.

Figura 49 - *Oxyrhopus rhombifer* (falsa-coral)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 50 - *Philodryas olfersii* (cobra-verde)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 51 - *Crotalus durissus cascavella*
(cascavel)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 52 - *Boa constrictor* (jibóia)



Fonte: Os Autores (2024).

2.4 Anfíbios

Os anfíbios incluem animais bem conhecidos, como os sapos, pererecas e rãs (ordem Anura), salamandras e tritões (ordem Caudata) e cobras-cegas e cecílias (ordem Gymnophiona). Considerados como importante elo da cadeia alimentar, os anfíbios são conhecidos como grandes devoradores de insetos, controlando pragas em agricultura. Evolutivamente situados entre peixes e répteis, foram os primeiros vertebrados a ganhar o meio terrestre, embora não definitivamente, uma vez que dependem da água para reprodução.

Habitantes intermediários entre o meio aquático e o ambiente terrestre, devido a sua fisiologia e adaptação ao meio, mantêm uma forte vinculação à água devido à umidade e permeabilidade da pele, podendo perder muita água para o ar por evaporação e por dependerem da água para reprodução (Pough *et al.*, 2003).

Muitas espécies de anfíbios são consideradas excelentes bioindicadores (Haddad, 1998; Toledo, 2009), principalmente por serem sensíveis a alterações ambientais físicas (umidade,

temperatura, desmatamento) e químicas (poluição, agrotóxicos), além de apresentarem características peculiares, como alto grau de filopatria (fidelidade a um sítio reprodutivo), área de vida restrita, passível de delimitação e facilidade de encontro no habitat (captura e recaptura) (Toledo, 2009).

Cerca de 1.188 espécies de anfíbios são conhecidas no Brasil, o país com a maior diversidade, distribuídas em 1.144 anuros, 39 cecílias e cinco salamandras (Segalla *et al.*, 2021). Para o Cerrado, foram registradas 204 espécies de anfíbios, e destas 108 são endêmicas. Esta alta diversidade pode ser explicada pela elevada heterogeneidade de fitofisionomias nesta unidade fisiográfica, acarretando elevada taxa de endemismos e inserindo no Cerrado que está entre os *hotspots* considerados prioritários para conservação da biodiversidade (Valdujo *et al.*, 2012; *Critical Ecosystem Partnership Fund Ecosystem Profile Cerrado Biodiversity Hotspot*, 2018; Myers *et al.*, 2000).

Populações de anfíbios estão desaparecendo em todo o mundo a uma taxa alarmante, e algumas dessas extinções podem ser causadas por efeitos regionais ou globais de atividades humanas, que provavelmente também afetam outros organismos (Pough *et al.*, 2003). A diminuição de certas populações tem sido atribuída a alterações globais de clima (Heyer *et al.*, 1988; Weygoldt, 1989), introdução de espécies exóticas, desequilíbrio predador-presa, caça, aumento de radiação ultravioleta-B, comércio ilegal, chuvas ácidas e poluição por agrotóxicos, doenças infecciosas, mudanças climáticas, perda e fragmentação de habitat (Toledo, 2009; Verdade; Dixo *et al.*, 2010).

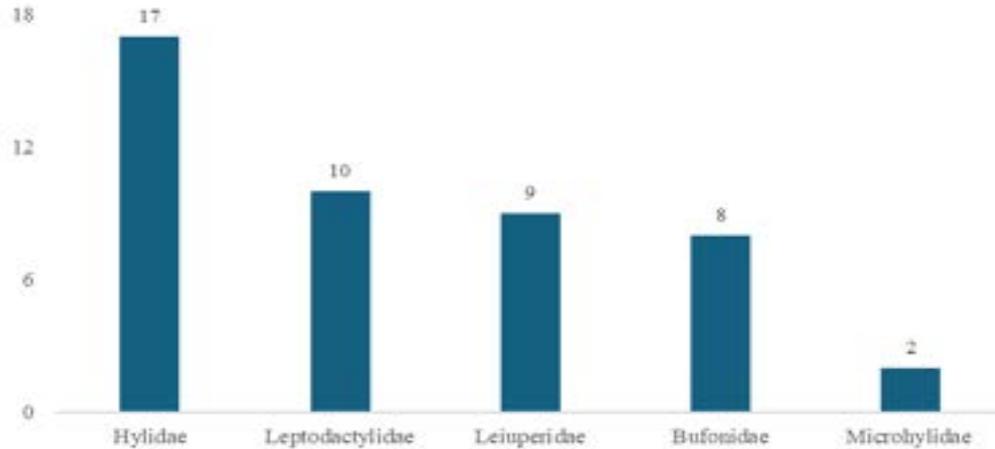
De acordo com Valdujo (2011), estudos baseados em dados de ocorrência de espécimes de museu do Cerrado Brasileiro descreveram a heterogeneidade na riqueza de anuros e o endemismo dentro do domínio, com ambos atingindo valores mais altos na porção sudeste. Além da heterogeneidade espacial, ecológica e ambiental do Cerrado (Silva *et al.*, 2006), as diferenças na composição das espécies também podem ser favorecidas pelos contatos com quatro principais domínios fitogeográficos sul-americanos: Amazônia, Floresta Atlântica, Caatinga e Chaco (Joly *et al.*, 1999).

Por meio do Método denominado *Rapid Assessment Project* - RAP (Parker; Carr, 1992; Foster *et al.*, 1994), levantamentos e inventários conduzidos em diferentes áreas de Cerrado no MATOPIBA, identificou-se a ampla ocorrência das espécies da herpetofauna (anfíbios), por dados primários e secundários, totalizando 46 (quarenta e seis) espécies de anuros, distribuídas entre as famílias Hylidae (17 espécies ou 37%), Leptodactylidae (10 espécies ou 22%), Leiuperidae (09 espécies ou 20%), Bufonidae (08 espécies ou 17%) e Microhylidae (02 espécies ou 4%) (Figura 55).

As espécies mais comumente encontradas foram: *Rhinella jimi* (Stevaux, 2002), *Rhinella mirandaribeiroi* (Gallardo, 1965) (Bufonidae), *Leptodactylus fuscus* (Schneider, 1799) (Leptodactylidae), *Physalaemus cuvieri* Fitzinger, 1826, *Physalaemus kroyeri* (Reinhardt; Lutken, 1862) e *Physalaemus centralis* Bokermann, 1962 (Leiuperidae) e *Elachistocleis cesarii* (Miranda-Ribeiro, 1920) (Microhylidae) sendo observados nas buscas ativas das áreas alagadas e de brejos, além da vocalização. Valdujo (2009), levantando a fauna de anfíbios na região da Oeste da Bahia registrou 35 (trinta e cinco) espécies, sendo 15 (quinze) espécies na região de Barreiras, 33 (trinta e três) espécies na região de São Desidério e 21 (vinte e um) espécies em Jaborandi. Nenhuma das espécies registradas figura entre as ameaçadas de extinção ou vulneráveis (MMA, 2018). Nove espécies (19,6%) são endêmicas do Cerrado, dez (21,7%) são

compartilhadas com o bioma Caatinga, 5 (10,9%) compartilhadas com a Mata Atlântica e vinte e dois (47,8%) estão espalhadas por biomas adjacentes.

Figura 55 - Número de espécies registrados por família de anfíbios.



Fonte: Os Autores (2024).

A família Bufonidae é representada pelos sapos que apresentam o corpo coberto por glândulas que secretam toxinas, conferindo à pele de aparência seca, um aspecto rugoso e com várias protuberâncias. No Nordeste do Brasil conhece-se pelo menos 05 (cinco) espécies desta família, que estão bem distribuídas pelos vários ecossistemas encontrados no domínio semi-árido (Freitas; Silva, 2007). *Rhinella jimi* (Stevaux, 2002) (Figura 56), *Rhinella mirandaribeiroi* (Gallardo, 1965) (Figura 57) foram as espécies encontradas em maior abundância dentro dessa família, em toda a área de estudo. As demais espécies da família Bufonidae (*Rhinella crucifer* (Wied-Neuwied, 1821) e *Rhinella granulosa* (Spix, 1824) foram encontradas em menor frequência.

Figura 56 - *Rhinella jimi* (sapo-cururu)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 57 - *Rhinella mirandaribeiroi* (sapo-do-cerrado)



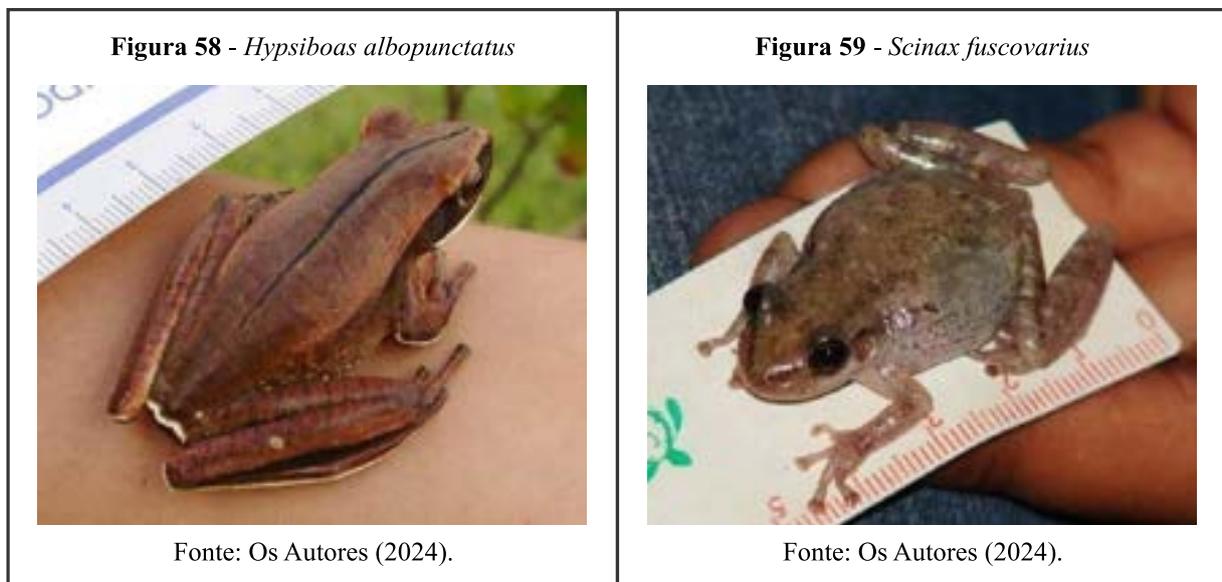
Fonte: Os Autores (2024).

A família Hylidae é constituída pelas típicas pererecas adaptadas à vida arbórea, de pernas alongadas e pontas dos dedos dilatados para facilitar a aderência em superfícies, às vezes, em ângulos negativos com paredões rochosos, troncos de árvores, entre outros. Os representantes da família Hylidae apresentaram, de uma forma geral, maior representatividade, em termos de ocupação dos ambientes de mata em relação às quatro famílias registradas: Leiuperidae, Leptodactylidae, Bufonidae e Microhylidae.

A espécie *Hypsiboas albopunctatus* (Spix, 1824) (Figura 58) é uma perereca de médio a grande porte (3 a 6,5 cm de comprimento rostro-cloacal - CRC), que possui ampla distribuição no Brasil, sendo uma espécie típica de Cerrado. Seu colorido vai do amarelo ao marrom-claro. Como característica distintiva possui pintas na face posterior das coxas. Essas pintas são amarelas em vida, mas foram descritas como se fossem brancas pelo fato dos autores se basearem em exemplares preservados; daí vem o termo “albopunctata”. Seu focinho possui uma faixa lateral escura, sendo a região abaixo dessa faixa - a “máscara” - de coloração marrom-escura a negra. Valdujo (2009), também registrou essa espécie na região oeste da Bahia.

Também, habita áreas abertas do sudeste e sul do Brasil. É uma espécie adaptada a viver em ambientes urbanos, sendo comum encontrá-la em locais úmidos, como brejos ou mesmo em banheiros. Possui colorido variado, desde castanho claro com pequenas manchas dorsais que se tornam mais claras. O comprimento rostro-anal varia entre 3,0 e 4,0 cm.

A espécie *Scinax fuscovarius* (Lutz, 1925) (Figura 59) habita áreas abertas do sudeste e sul do Brasil alimentando-se de insetos. É uma espécie adaptada a viver em ambientes urbanos, sendo comum encontrá-la em locais úmidos, como em brejos, ou mesmo banheiros. Possui colorido variado, de castanho claro com pequenas manchas dorsais a escuro quase negro, com as mesmas manchas dorsais que se tornam mais claras. O comprimento rostro-anal varia entre 3,0 e 4,0 cm. Emitem vocalizações que lembra o raspar da colher numa cuia de cabeça (Freitas & Silva, 2007).



Espécie pequena, atingindo pouco mais de 2,0 cm de comprimento rostro-anal, a perereca *Dendropsophus minutus* (Peters, 1872) tem uma ampla distribuição. Possui coloração castanha,

castanho-alaranjada ou bege, com uma mancha mais escura no dorso, inteira ou dividida, que lembra a forma de uma “ampulheta” (Freitas; Silva, 2007).

A família Leiuperidae compreende rãs cuja forma de reprodução e deposição dos ovos em bolsas de espumas é feita pelo macho, que esfrega rapidamente o muco presente no dorso e região inguinal da fêmea. Esta espuma possui propriedades que protegem os ovos contra a ação de microrganismos e ressecamento, favorecendo assim, a espera de maior volume de água para os girinos. Após o período de alguns dias, os ovos eclodem e os girinos nascem e completam o seu ciclo em lagos temporários, lagoas ou riachos.

O gênero *Physalaemus* forma o grupo de indivíduos mais abundante na área estudada, observadas em diversos ambientes, desde áreas abertas, até as matas mais fechadas, nas áreas alagadas e de brejos, além da vocalização. A espécie *Physalaemus centralis* Bokermann, 1962 (Figura 60) pode alcançar cerca de 4,0 cm de comprimento rostro-anal. É uma espécie típica do Brasil Central que costuma se alimentar de pequenos insetos. A rã *Physalaemus kroyeri* (Reinhardt; Lutken, 1862) (Figura 61) é uma espécie pequena que pode alcançar 3,0 cm comprimento rostro-anal. Apresenta um colorido cinza claro, com dois ocelos negros bem visíveis acima da cloaca. No dorso apresenta duas manchas que lembram um “S” bem aberto, e entre os olhos uma marca em forma de “V” (Freitas; Silva, 2007).

Figura 60 - *Physalaemus centralis* (rã)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 61 - *Physalaemus kroyeri* (rã-piadeira)



Fonte: Os Autores (2024).

A família Leptodactylidae é exclusiva das Américas, com mais de 800 espécies e cerca de 50 gêneros (Kwet; Di-Bernardo, 1999 *apud* Freitas; Silva, 2007). Caracterizadas pelas típicas rãs, e caracteriza-se por espécies que apresentam desde um centímetro de comprimento, até as gigantes rãs-pimenta (*Leptodactylus*), que pode atingir 25 cm de comprimento rostro cloacal (CRC).

A espécie *Leptodactylus fuscus* (Schneider, 1799) (Figura 62) pequena espécie que dificilmente ultrapassa 5,0 cm de comprimento rostro-anal. Habita áreas preferencialmente abertas e áreas de matas em todo o Nordeste. Possui uma vocalização característica que lembra o assobio curto de um homem chamando um cão, repetido em sequência espaçada e

relativamente potente para uma rã de pequeno porte. Esta espécie foi comumente encontrada em áreas de vereda (Freitas; Silva, 2007).

O *Leptodactylus vastus* A. Lutz, 1930 (Figura 63) é considerado o maior anuro do Brasil, alcançando cerca de 25cm de comprimento rostro-anal, pesando cerca de um quilo. Habita áreas do Cerrado e Caatinga, carnívoros, estando presente em sua dieta artrópodes e pequenos vertebrados como outras rãs, serpentes e camundongos (Freitas; Silva, 2007).

Figura 62 - *Leptodactylus fuscus* (caçote)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 63 - *Leptodactylus vastus* (rã-pimenta)



Fonte: Os Autores (2024).

2.5 Peixes

Peixes, de forma geral, podem ser definidos como um conjunto de espécies que vivem em ambiente aquático possuem escamas, utilizam-se de movimentos da base da cauda para locomover-se e tem o sistema olfativo diferenciado da respiração (Pough; Janis; Heiser, 2003). Algumas espécies apresentam sensores químicos ou físicos especializados para determinados estímulos, como campos elétricos; outras podem gerar campos elétricos com funções diversas de eletorrecepção e eletrocomunicação; algumas apresentam visão de cores, outras têm olhos residuais ou mesmo ausentes. Embora grande parte deles absorva oxigênio da água pelas brânquias (guelras) ou pele, tal função não é regra. Os ambientes em que são encontrados variam desde fossas abissais até poças de água, sob uma diversidade de condições de salinidade, dureza da água, pH, turbidez, ou quantidade de matéria em suspensão (Gouveia-Jr., 2006).

Ainda, segundo Gouveia-Jr. (2006), é um grupo bastante diverso, e sua distribuição comportamental em termos de alimentação inclui desde filtradores de resíduos até carnívoros, passando por diversos tipos de dieta. Existem peixes gregários, solitários, que estabelecem hierarquias, que formam casais e que constroem ninhos. Seu tamanho pode variar desde milímetros até metros; sua reprodução pode ser por partenogênese, ovípara ou ovovivípara; pode apresentar cuidado com o filhote ou não.

As espécies da ictiofauna se destacam como as melhores bioindicadores de qualidade ambiental, devido ao fato de serem animais que apresentam maior mobilidade, podendo fornecer uma avaliação espacial dos impactos no âmbito da bacia hidrográfica (Brooker;

Dunbar, 2004). Há muitas vantagens na utilização dos peixes, pois além de possuir uma vida relativamente longa e ter sua ecologia e habitats bem conhecidos, possibilitam maior agilidade na coleta e identificação das espécies (Harris, 1995 *apud* NSW, 2006).

A degradação ambiental advinda dos impactos antrópicos sobre as bacias hidrográficas afeta a estrutura e, conseqüentemente, a qualidade ambiental dos habitats, tornando-se um dos principais fatores que comprometem a integridade dos organismos aquáticos (Callisto *et al.*, 2002), tais como: modificação na composição ictiofaunística; a interrupção no processo migratório; inibição da reprodução; facilitação na introdução de espécies exóticas; mudanças de comportamento, desorientação, desequilíbrio, imobilização e morte; aumento na vulnerabilidade à predação; interferência nas áreas de alimentação e recrutamento de filhotes; e, aumento de enfermidades.

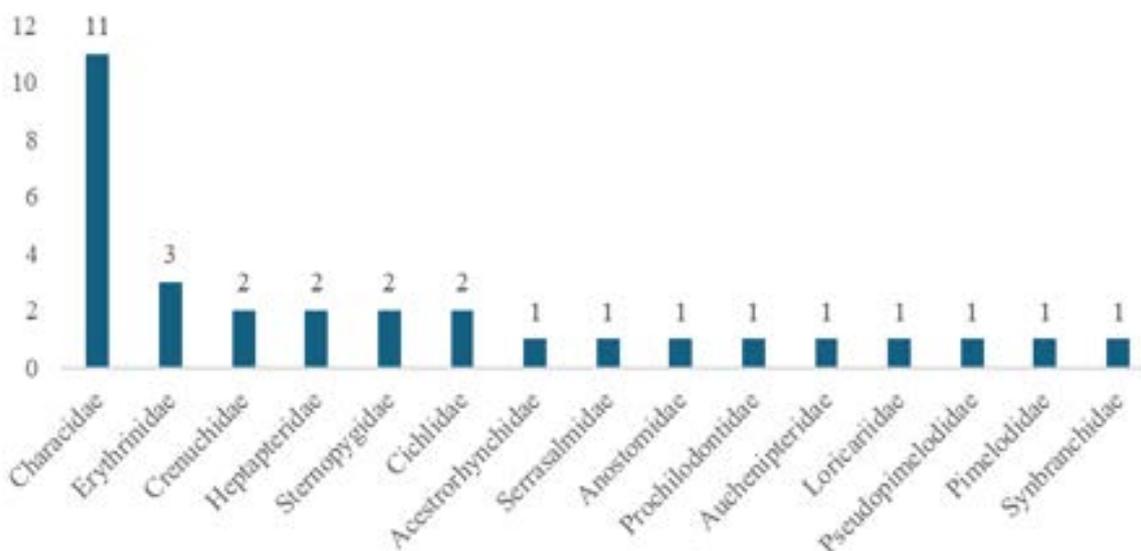
As regiões localizadas no Cerrado possuem cerca de 848 espécies de peixes descritas (MMA, 2007), e aproximadamente 25% são representadas por espécies endêmicas. Na porção do Cerrado da bacia do rio São Francisco, Britski (1998) descreveu 153 espécies, distribuídas em 90 gêneros e 26 famílias, mas muitas áreas dessa bacia inseridas em regiões de Cerrado ainda não foram inventariadas, principalmente as localizadas na região oeste da Bahia (MMA, 2007).

O presente estudo, ocorreu restritamente na bacia do rio de Grande, município de Barreiras, Oeste da Bahia, bioma Cerrado, onde verifica-se acelerado crescimento econômico advindo das atividades agrosilvopastoris, sobretudo a agricultura irrigada. A Ictiofauna do rio Grande é pouco conhecida e vem sofrendo formas diversas de degradação ambiental. Alterações antrópicas diretas nos ecossistemas aquáticos, tais como usos diversos da água para navegação, geração de energia, depósito de poluentes, irrigação, controle de inundações e introdução de espécies exóticas, ou ainda, indiretas nas bacias de drenagens, como desmatamentos, assoreamento, agricultura, pastagens e outras degradações difusas ocasionam modificações na estrutura e nos processos desses ecossistemas, interferindo de forma diferenciada na capacidade de sobrevivência das diferentes espécies da comunidade (Costa, 2001). As respostas das comunidades de peixes a esses fatores estressores alteram a integridade ecológica desses ecossistemas que passam a flutuar em níveis de organização relativamente mais baixos.

No rio Grande, a pesca comercial vem sendo explorada pelos pescadores profissionais. Atualmente, os peixes mais procurados pelo seu valor econômico são o *Pseudoplatystoma coruscans* (Spix; Agassiz, 1829) (surubim) e o *Salminus brasiliensis* (G. Cuvier, 1816) (dourado). Os órgãos públicos que atuam no setor não possuem informações sobre estoques pesqueiros disponíveis na região, nem um levantamento da ocorrência das espécies de peixes que habitam o rio Grande.

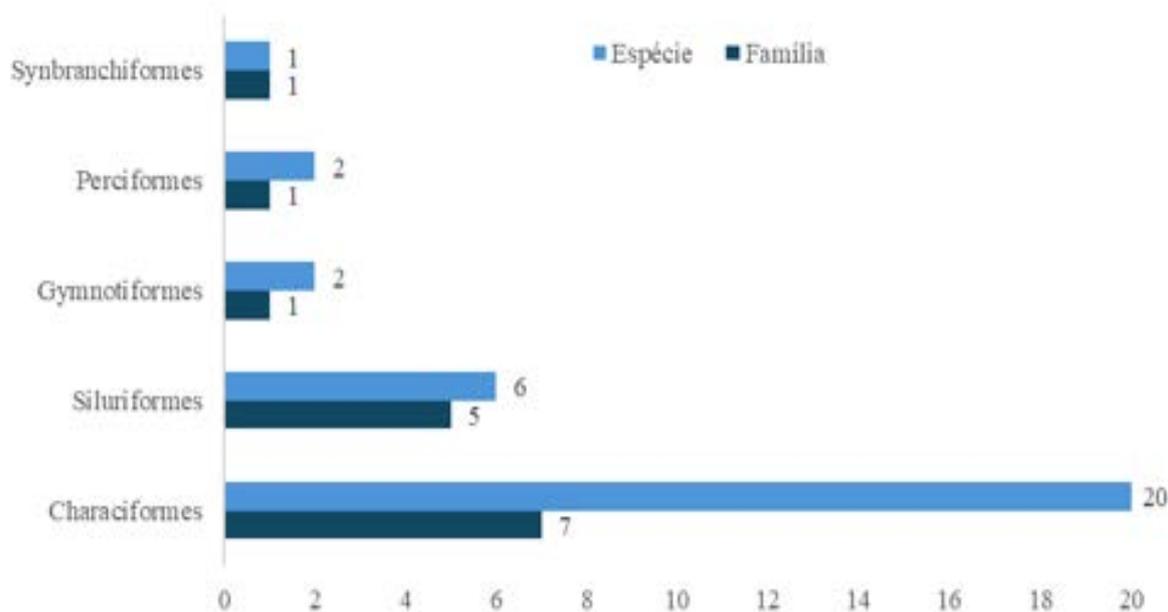
Através do reconhecimento e levantamento qualitativo da ictiofauna local, constatando os seguintes procedimentos: Observações de campo; Levantamento secundário da área de influência direta e indireta; Registro fotográfico; Entrevista com pescadores locais; Revisão bibliográfica, foram registradas 31 espécies (Figuras 64 e 65). Characidae é a família mais encontrada nas águas do rio Grande, com 11 (onze) espécies, seguida dos Erythrinidae com 03 (três) espécies.

Figura 64 - Número de espécies registrados por família de peixes



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 65 - Registro das ordens de peixes com seus respectivos números de famílias e espécies



Fonte: Os Autores (2024).

A família Characidae quando comparada com as demais famílias da ordem Characiformes é a maior e a mais complexa, nela estão peixes de hábitos alimentares muito complexos (herbívoros, onívoros e carnívoros) e que exploram uma grande variedade de habitats (Britski

et al., 1998). Tetragonopterinae é a subfamília que representa o maior número de espécies no Brasil, um grupo bastante diversificado, com muitos gêneros e espécies.

O gênero *Astyanax* é formado por peixes com grande diversidade nas bacias da América do Sul, apresentando mais de 80 espécies de lambaris ou piabas conhecidas para as águas continentais brasileiras. As piabas habitam diversos ambientes aquáticos, como rios, riachos, lagoas e represas, mesmo naqueles onde há ocupação humana. A espécie *Astyanax bimaculatus* (Linnaeus, 1758) (lambari) (Figura 66) se alimenta tanto de recursos de origem alóctone (frutos, sementes e insetos terrestres), quanto de origem autóctone (insetos e vegetais aquáticos, escamas, ovócitos, entre outros). Forrageiam em todos os níveis tróficos, ou seja, podem ser consumidores primários (alimentando-se de plantas e fitoplâncton), secundários ou terciários (ingerindo zooplâncton, insetos e peixes). Até mesmo detritos e sedimentos são ingeridos por eles. O oportunismo desses peixes é a característica que lhes confere uma enorme capacidade de colonizar diferentes habitats.

A ordem Siluriformes é caracterizada por peixes com formas e tamanhos variados, possuem hábitos predominantemente crepusculares e noturnos, os quais geralmente habitam os fundos dos rios, permanecendo entre as rochas e vegetação (Paxton; Eschmeyer, 1995). São caracterizados principalmente por possuírem total ausência de escamas pelo corpo, que pode ser revestido por uma pele espessa popularmente conhecida como couro ou então coberto com placas ósseas, total ou parcialmente; e a presença de um acúleo forte e pungente a frente do primeiro raio das nadadeiras dorsal e peitoral, sendo que em alguns grupos há presença de barbilhões (Burgess, 1989). A maioria dos Siluriformes possuem vida noturna e se locomovem pelo fundo do rio. Apresentam cuidado parental bem desenvolvido, sendo que os embriões e cardumes jovens são guardados pelo macho. Segundo Azevedo (1938) a desova se realiza nas tocas ou locais onde os animais se refugiam. São espécies que migram rio acima para se reproduzir. Esta estratégia é usada para maximizar a produção reprodutiva e está adaptada à previsibilidade dos ciclos anuais das cheias e secas.

Os cascudos ou acaris, nomes pelos quais são conhecidos os peixes da família Loricariidae, tem ampla distribuição pela América do Sul e compreendem centenas de espécies (Britski *et al.*, 1988). À família Loricariidae, apresenta cerca de 600 espécies e 6 subfamílias (Suzuki *et al.*, 2000). A subfamília Hypostominae, constitui um dos grupos de siluriformes mais recentes na América do Sul, que engloba muitas formas, o que estimula estudos sobre a especiação desses peixes. Esta subfamília é composta por 19 gêneros, dentre eles está o *Pterygoplichthys etentaculatus* (Spix; Agassiz, 1829) (Figura 67). No geral, são peixes de fundo onde vivem raspando o substrato para alimentar-se (Britski *et al.*, 1988). A estratégia reprodutiva desse gênero na bacia do São Francisco aparentemente não necessita efetuar grande migração reprodutiva, tem fecundação externa e desova em áreas rochosas e de cascalho (Sato *et al.*, 2003).

Figura 66 - *Astyanax cf. bimaculatus* (lambari)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 67 - *Pterygoplichthys etentaculatus*



Fonte: Os Autores (2024).

O levantamento ictiofaunístico é uma etapa primária para o desenvolvimento de estudos biológicos aprofundados do meio ambiente (Lopes, 2006), possibilitando estimar e valorar a diversidade biológica de determinada região e verificar as alterações decorrentes das atividades impactantes. Agostinho *et al.* (2005) destacam a imprecisão no número de espécies dos ecossistemas aquáticos continentais brasileiros, resultantes do elevado número de bacias hidrográficas ainda não inventariadas MMA (2007) enfatiza que a carência de estudos ictiofaunísticos nas cabeceiras dos rios do Cerrado gera desconhecimento da fauna local e dificulta a elaboração de medidas para conservação de suas espécies.

3. Considerações finais

A Savana brasileira está passando por intenso processo de modificação da paisagem, no qual se observa a transformação de áreas nativas em áreas agrícolas, fazendo com que a fauna de vertebrados sofra intensas pressões, sendo o desmatamento considerado como a principal causa de extinção de espécies. Esforços devem ser concentrados para aumentar o conhecimento da fauna local, e assim priorizar a conservação das espécies e dos habitats (Fahrig, 2003), com a ampliação de estudos, pesquisas e inventários que contribuirão de maneira significativa para o estabelecimento de estratégias de conservação e de preservação. A melhor estratégia para proteção a longo prazo da diversidade biológica é a preservação de comunidades naturais e populações no ambiente natural. Somente na natureza as espécies serão capazes de continuar o processo de adaptação evolucionária para um ambiente em mutação dentro de suas comunidades naturais.

Alguns grupos de vertebrados, tais como mamíferos e aves, apresentam maior capacidade de dispersão, por conseguinte, tendem a se deslocar frente a modificações na paisagem. No entanto, outros grupos, principalmente as de média e alta sensibilidade a distúrbios antrópicos, bem como as dependentes de florestas tendem a ser mais fiéis aos seus territórios, a exemplo da herpetofauna, fazendo com que estejam mais susceptíveis ao declínio populacional. Portanto, é de fundamental importância o planejamento nas aberturas de novas áreas, de modo a não permitir formação de ilhas de vegetação, uma vez que, conectividades entre as áreas

institucionalmente legais, tais como, áreas de Reserva Legal, Áreas de Preservação Permanente ou até mesmo, áreas de vegetação remanescentes, se conectadas, trarão mais sucesso para a conservação da biodiversidade local.

Dessa forma, considerando que Brasil é o país com a maior diversidade biológica do mundo, somado às altas taxas de endemismo no Cerrado, ameaçadas de extinção e alta sensibilidade a distúrbios antrópicos, reforça-se a importância na manutenção das paisagens naturais para conservação da fauna, uma vez que, ambientes bem conservados, tem grande valor econômico, estético e social.

Referências

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo. Ateliê Editorial. 159 p. 2003.

AGOSTINHO, A. A.; H. F. JÚLIO JR. **Peixes da bacia do alto rio Paraná**, p. 374-400. In: R. H. 2005.

AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; PELICICE, F. M. **Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil**. Maringá: Eduem, 501p. 2007.

Argolo, A.J.S. 2000. *Aparasphenodon brunoi*. **Herpetological Review**, 31(2): 108.

ARGÔLO, A. J. S. **As serpentes dos cacauais do sudeste da Bahia**. Ilhéus, BA: Editus, 260p. 2004.

AGUIAR, L. M. de S.; CAMARGO, A. J. A. de. **Cerrado: ecologia e caracterização**. Brasília, DF: Embrapa Informacao Tecnologica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

AGUIAR, L.M. S.; MACHADO, R. B.; MARINHO-FILHO, J. A diversidade biológica do Cerrado. In: AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. J. A. de. **Cerrado: ecologia e caracterização**. Planaltina-DF, EMBRAPA Cerrados, 2004. 17- 40 p. ISBN. 85-7383-261-4.

ALMEIDA JÚNIOR, V. D. **Avaliação da condução dos planos de resgate da fauna, em áreas destinadas ao uso alternativo do solo no Cerrado, na região oeste da Bahia, Brasil**. Dissertação de mestrado. São Francisco de Paula: UERGS, 131 f. il. 2022.

ALMEIDA, I. G.; REIS, N. R.; ANDRADE, A. R. *et al.* Mamíferos de médio e grande porte de uma mata nativa e um reflorestamento no município de Rancho Alegre, Paraná, Brasil. In: REIS, N. R.; PERACCHI, A. L.; SANTOS, G. A. S. D. **Ecologia de mamíferos**. Londrina, p.133-143. 2008.

ALVES, D. G. L. *et al.* **Estrutura e Função da Pele**. Medicina ambulatorial IV com ênfase em dermatologia, p. 13-24. 2016.

AZEVEDO, P.; GOMES, A. L. Contribuições ao estudo da traíra *Hoplias malabaricus* (Bloch, 1974), **Boletim de indústria animal**, v. 5, p. 15-64. 1943.

AZEVEDO, P. Da Biologia dos Peixes Nordestinos. (Fragmento Biocenotico). In: Livro Jubilar do Professor Lauro Travassos, pp. 51-60, Rio de Janeiro. 1938.

BASTOS R. P. 2007. **Anfíbios do Cerrado**. Sociedade Brasileira de Herpetologia. 354p.

-
- BORGES, D.M. Herpetofauna do Maciço de Baturité, Estado do Ceará: Composição, Ecologia e Considerações Zoogeográficas. 1991. 91p. **Dissertação (Mestrado)**, Universidade Federal da Paraíba. 1991.
- BRITSKI, H. A.; Y SATO; A.B.S. ROSA. **Manual de identificação de peixes da região de Três Marias (com chaves de identificação par os peixes da bacia do rio São Francisco)**. 2. ed. Brasília, CODEVASF, 115 p. 1986.
- BRITSKI H. A.; SATO Y.; ROSA A. B. S. **Manual de Identificação de Peixes da Região de Três Marias**. Brasília: CODEVASF., 1988.
- BURGESS, W. E. **An Atlas of Freshwater and Marine Catfishes. A preliminary survey of Siluriformes**. T.F.H. Publications, Neptune, NJ. 1989.
- CALLISTO, M. *et al.* **Aplicação de um protocolo de avaliação rápida da diversidade de habitats em atividades de ensino e pesquisa (MG-RJ)**. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 14, n. 1, p. 91-98, 2002.
- CAVALCANTI, R. B. *et al.* Cerrado. *In*: SCARANO, F. R. *et al.* (Org.). **Biomás brasileiros: retratos de um país plural**. Rio de Janeiro: Casa da Palavra; CI, 2012. p. 56-91.
- CERQUEIRA, R. *et al.* Fragmentação: alguns conceitos. *In*: RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. A. S. (Orgs.). **Fragmentação de Ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas**. Brasília: MMA/SBF. p. 23-40. 2005.
- COMBRINK, X.; WARNER, J. K.; DOWNS, C. T. Crocodiles. *In*: **Ecology and Conservation of Estuarine Ecosystems: Lake St. Lucia as a Global Model** (R. H. T. Renzo Perissinotto, Derek D. Stretch, ed.) New York, 486p. 2013.
- CONRAD, J. L. Phylogeny and systematics of Squamata (Reptilia) based on morphology. *Bull. Am. Museum Nat. Hist.* (310):1–182. 2008.
- COSTA, H. C.; GUEDES, T. B.; BERNILS, R. S. **Lista de Répteis do Brasil: padrões e tendências**. *Herpetol. Bras.* 10(3):110–279, 2021.
- CRITICAL ECOSYSTEM PARTNERSHIP FUND ECOSYSTEM PROFILE CERRADO BIODIVERSITY HOTSPOT: EXTENDED SUMMARY / **Critical Ecosystem Partnership Fund**; coordenador Donald Sawyer... [*et al.*]. – Brasília: Supernova, 2018. Disponível em: https://cepfcerrado.iieb.org.br/wp-content/uploads/2019/12/VERS%C3%83OFINALWEB_Sum%C3%A1rio_PT_maio19.pdf. Acesso em: 22 fev. 2021.
- DIAS, B. F. S. **Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Brasília, DF: Funatura, 1992. 97 p.
- DIRZO, R.; MIRANDA, A. **Contemporary neotropical defaunation and the forest structure, function and diversity – a sequel to John Terborgh**. *Conservation Biology*. 4: 444-447, 1991.
- DUNBAR, M. J.; IBBOTSON, A. Predicting juvenile salmonid drift-feeding habitat quality using a three-dimensional hydraulic-bioenergetic model. **Ecol. Model.** v. 177, n.1-2, p. 157-177, 2004.

-
- EITEN, G. **The Cerrado Vegetation of Brazil**. The Botanical Review, New York, V. 38, p.201-341. 1972.
- EITEN, G. **Vegetação do Cerrado**. In: Pinto, M.N. (org.) Cerrado. Caracterização, ocupação e perspectivas. Editora Universidade de Brasília - UNB, Brasília, 09-65p. 1990.
- EMMONS, L. H. **Comparative feeding ecology of felids in a Neotropical rainforest**. **Behavioral Ecology and sociobiology**, 20: 271-283. 1987.
- FONSECA, G. A. B.; ROBINSON, J. G.; Forest Size and Structure: Competitive and predatory effects on small mammal Communities. **Conservation Biology**, 53:265-294, 1990.
- FRAGOSO, J. M. V. **Large mammals and the dynamics of an Amazonian rain forest**. Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL. 1994.
- FREITAS, M.A. **Serpentes Brasileiras**. Lauro de Freitas, Bahia. 160 p. 2003.
- FREITAS, M. A.; SILVA, T. F. S. **Guia Ilustrado – Mamíferos na Bahia: espécies Continentais**. Ed.USEB, Pelotas, RS. 132p. 2005.
- FREITAS, M. A. **A Herpetofauna das Caatingas e Áreas de Altitudes do Nordeste Brasileiro**. Ed.USEB, Pelotas, RS. 388p. 2007.
- FREITAS, M. A. de; SILVA, T. F. S. **Guia Ilustrado: A Herpetofauna das Caatingas e Áreas de Altitudes do Nordeste Brasileiro**. Editora: USEB; Edição: 1ª Ed. 384 p. 2007.
- FREITAS, M. A. **A herpetofauna da Mata Atlântica nordestina: guia ilustrado**. Vol. 6. Editora: USEB, 161 p., 2005.
- FERREIRA, S. H.; BARTELT, D. C.; GREENE, L. J. Isolations of bradykinin-potentiating peptides from Bothrops jararaca venom. **Biochem**, 23; 9 (13): 2583-93, 1970.
- FOSTER, R. B., T. A; PARKER, A. H. GENTRY, L. H. *et al.* **The Tambopata-Candamo Reserved Zone of southeastern Peril: a biological assessment**. RAP Working Papers No. 6, Conservation International, Washington, D.C. 1994.
- GAFFNEY, E. S. Historical analysis of theories of chelonian relationship. **Syst. Zool.** 33(3):283–301. 1984.
- GOUVEIA JR., A.; MAXIMINO, C.; BRITO, T.M. **Comportamento de peixes: Vantagens e utilidades nas neurociências**. Faculdade de Ciências/UNESP. Bauru: SP. 2006.
- GWYNNE, J. A.; RIDGELY, R. S.; TUDOR, G. *et al.* **Aves do Brasil: Pantanal e Cerrado**. São Paulo, SP: Editora Horizonte. 322p. 2010.
- HADDAD, C.F.B., **Biodiversidade dos anfíbios no Estado de São Paulo**. Pp. 15-26. In: Castro, R.M.C. (ed.). **Biodiversidade do Estado de São Paulo, Brasil: síntese do conhecimento ao final do século XX**. Volume 6: Vertebrados, FAPESP, São Paulo. 71p. 1998.
- HARRINGTON, G. N.; FREEMAN; F. H. J. CROME. The effects of fragmentation of an Australian tropical rain forest on populations and assemblages of small mammals. **Journal of Tropical Ecology**, 17: 225-240. 2001.
- HASS, A. **Efeitos da criação da UHE Serra da Mesa (Goiás) sobre a comunidade de aves**. Tese de doutorado. Curso de Ecologia, Universidade de Campinas, Campinas, SP. 2002.

HERINGER, E. P.; BARROSO, G. M.; RIZZO, J. A. *et al.* **A Flora do Cerrado**. p. 211–232. *In:* MG Ferri, org. IV Simpósio sobre o Cerrado. EDUSP e Ed. Itatiaia, São Paulo e Belo Horizonte, Brasil. 1977.

HEYER, W.R.; RAND, A. S.; CRUZ C. A. G. *et al.* Declinations, extinctions, and colonizations of frog populations in southeast Brazil and their evolutionary implications. **Biotropica**, 20:230-235, 1988.

HICKMAN, C. P.; ROBERTS, L. S.; LARSON, A. **Princípios integrados de Zoologia**. 11 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 846. 2004.

HUEY, R. B.; PIANKA, E. R. 1981. Ecological consequences of foraging mode. **Ecology**, 62: 991-999.

JARED, C.; ANTONIAZZI, M. M.; CALLEFFO, M. E. V. **Quelônios, crocodilianos, lagartos e anfisbenídeos**. 1a Edição ed. Instituto Butantan, São Paulo, 20 p. 2016.

JOYCE, W. G.; PARHAM, J. F.; GAUTHIER, J. A. Developing a Protocol for the Conversion of Rank-Based Taxon Names To Phylogenetically Defined Clade Names, As Exemplified By Turtles. **J. Paleontol.** 78(5):989–1013, 2004.

JUCÁ-CHAGAS, R. Air breathing of the neotropical fishes *Lepidosiren paradoxa*, *Hoplerythrinus unitaeniatus* and *Hoplosternum littorale* during aquatic hypoxia. *Comp. Biochem. Physiol.* 139(A):49-53, 2004.

JUNIPER, T.; PARR, M. **Parrots: A guide to the parrots of the world**. Pica Press, Sussex. 1998.

JOLY, C.A.; AIDAR, M.P.M.; KLINK, C.A. *et al.* Evolution of the Brazilian phytogeography classification systems: implications for biodiversity conservation. **Cien. Cult.** 51(5-6):331-348, 1999.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.

KUHLMANN, M. **Aves do Cerrado: espécies visitantes em uma área em recuperação no Distrito Federal**. Brasília: Athalaia. 164 p., 2020.

LAURANCE, WF. Rainforest fragmentation and the structure of small mammal communities in tropical Queensland. **Biological Conservation**, 57: 205-219, 1994.

LIDDLE, M. J.; SCORGIE, R. A. The effects of recreation on freshwater plants and animals: A review. **Biology Conservation** 17:183-206, 1980.

LOWE-McCONNELL. **Estudos ecológicos de comunidades de peixes tropicais**. São Paulo: Edusp, 534p. 1999.

MACHADO, R. B. **A fragmentação do Cerrado e efeitos sobre a avifauna na região de Brasília - DF**. Tese de doutorado. Curso de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília-DF. 163 pp., 2000.

MACHADO, R. B. *et al.* **Estimativas de perda de área do cerrado brasileiro**. Relatório técnico não publicado. Conservação Internacional, Brasília, DF. 2004.

MACHADO, R. B. *et al.* Caracterização da Fauna e Flora do Cerrado. *In:* **Savana: Desafios e Estratégias para o equilíbrio entre a Sociedade, Agronegócio e recursos naturais**.

Editores técnicos: Fábio Galape Faleiro, Austeclínio Lopesde Farias Neto, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 1198 p.il. 2008.

MARINHO-FILHO, J.; RODRIGUES, F. H. G.; JUAREZ, K. M. The Cerrado Mammals: Diversity, Ecology, and Natural history. *In*: P.S. OLIVEIRA; R.J. MARQUIS (Org.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical Savanna**. Ed. Columbia University Press, New York, p.266-284. 2002.

MENDONÇA, R. C. *et al.* **Flora vascular do cerrado: Checklist com 12.356 espécies**. *In* Cerrado: ecologia e flora (SANO, S. M; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F., Eds.). Embrapa-CPAC, Planaltina, p.417-1279. 2008.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Cerrado e Pantanal: áreas e ações prioritárias para conservação. Brasília: MMA, 2007. 397 p.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Livro Vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção**. Edt. MACHADO, A. B. M.; DRUMMOND, G. M.; PAGLIA, A. P. Brasília, DF. MMA; Belo Horizonte, MG: Fundação Biodiversitas. 2v. (1420p.): il. (Biodiversidade, 19). 2008.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção**. Volume I / -- 1. ed. -- Brasília, DF: ICMBio/MMA, 2018. 492 p. 2018.

MITTERMEIER, R. A. *et al.* **Hotspots revisited: earth's biologically richest and most endangered ecoregions**. Conservation International, Mexico City. 2005.

MYERS, S.; MITTERMEIER, R. A.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403:853-858. 2000.

NEW SOUTH WALES. **Macro Water Sharing Plans: the approach for unregulated rivers**. Australia: Department of Natural Resources – NSW. 56p. 2006.

NOGUEIRA, C.; RIBEIRO, S.; COSTA, G. C. *et al.* **Vicariance and endemism in a Neotropical savanna hotspot: distribution patterns of Cerrado squamate reptiles**. *Journal Biogeographic* 38:1907–1922. 2011.

NUNES, R. B. **Evolução da viviparidade em Squamata: cenários evolutivos e raridade dos estágios intermediários**. *Rev. da Biol.* 121–26. 2008.

ODUM, P. E.; BARRET, G. W. **Fundamentos de ecologia**. São Paulo: Thomson, 2007.

ORR, R. T. **A Vida dos Vertebrados**. Editora Rocca. 5ª ed. São Paulo, SP. 508p. 1986.

OYAKAWA, O. T. **Family Erythrinidae. In Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America** (R. Reis, S. Kullander & C. Ferraris, eds.). EDIPUCRS, Porto Alegre, p. 238-240. 2003.

PACHECO, J. F.; SILVEIRA, L. F.; ALEIXO, A. *et al.* Annotated checklist of the birds of Brazil by the Brazilian Ornithological Records Committee, second edition. **Ornithology Research** 29: 94–105, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43388-021-00058-x>.

PAGLIA, A. P.; FONSECA, G. A. B.; RYLANDS, A. B. *et al.* Annotated checklist of Brazilian mammals. **Occasional Papers in Conservation Biology**, 6, 1–76, 2012. DOI: 10.1646/0006-3606(2000)032[0793: POFDAA]2.0.CO;2.

-
- PARDINI, R.; UMETSU, F. Pequenos mamíferos não-voadores da Reserva Florestal do Morro Grande: distribuição das espécies e da diversidade em uma área de Mata Atlântica. **Biota Neotrop.** 6. 2006.
- PARKER, T. A.; CARR, J. L. (Eds.). Status of forest remnants in the Cordillera de la Costa and adjacent areas of southwestern Ecuador. RAP Working Papers No. 2. Conservation International Washington, D.C. 1992.
- PAXTON, J.R.; ESCHMEYER, W.N. **Encyclopedia of fishes.** Academic Press, San Diego. 1995.
- PEHEK, E. L. Competition, pH, and the ecology of larval *Hyla andersonii*. **Ecology**, 76: 1786-1793. 1995.
- PERES, C. A. Population status of white-lipped *Taiassu pecari* and collared peccaries *T. tajacu* in hunted and un hunted amazonian forests. **Biological Conservation**, 77:115-123, 1996.
- PETRY, A. C. A traíra *Hoplias aff. malabaricus* (Bloch, 1794) na planície de inundação do alto rio Paraná: influência sobre as assembléias de peixes e aspectos da auto-ecologia. **Tese de Doutorado**, Ciências Ambientais - Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais. 2005.
- PIANKA, E. R.; L. J. VITT. **Lizards: Windows to the Evolution of Diversity.** University of California Press, Berkeley. 2003.
- PINCHEIRA-DONOSO, D. *et al.* Global Taxonomic Diversity of Living Reptiles. **PLoS One** 8(3):1–10, 2013.
- POUGH, F. H.; J. B. HEISER; W. N. McFARLAND. 2003. **A Vida dos Vertebrados.** 3ª Edição, Atheneu Editora São Paulo, São Paulo. 798p.
- QUAMMEN, D. **The Song of the Dodo.** Touchstone Book, New York. 1996.
- REDFORD, K. H. The empty forest. **BioScience**, 42:412-422. 1992.
- REIS, N. R.; PERACCHI, A. L.; PEDRO, W. A. *et al.* Mamíferos do Brasil. *In: Mamíferos do Brasil* (pp. 437-437). 2006.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. *In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (ed.). Cerrado: ambiente e flora. Brasília*, Embrapa Cerrados, p.87-166. 1998.
- RIBEIRO, J. F. As principais fitofisionomias do bioma cerrado. *In: SANO, S.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. (Ed.). Cerrado: Ecologia e Flora.* Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. P 151-212. 2008.
- RIEPPPEL, O. The classification of the Squamata. *In: The phylogeny and classification of the tetrapods* (M. J. Benton, ed.) Oxford: Clarendon Press, p.408–409. 1988.
- RODRIGUES, M. T. Sistemática, ecologia e zoogeografia dos *Tropidurus* do grupo *torquatus* ao sul do Rio Amazonas (Sauria, Iguanidae). *Arq. Zool.*, São Paulo, 31: 105-230. 1987.
- RODRIGUES, M. **Hidrelétricas, Ecologia Comportamental, Resgate de Fauna: Uma falácia.** Ponto de Vista - Natureza & Conservação – V. 4, Nº1, pp. 29-38. 2006.

-
- ROSS, J. P. (ed.). **Crocodiles. Status Survey and Conservation Action Plan.** IUCN/SSC Crocodile Spec. Group. IUCN, Gland. Switz. Cambridge, UK. 96 pp. 1998.
- RUEDA-ALMOACID, J. V. *et al.* **Las tortugas y los cocodrilos de los países andinos del trópico.** Série de guías tropicales de campo número 6. Bogotá, 538 pp. 2007.
- SBM - SOCIEDADE BRASILEIRA DE MASTOZOOLOGIA. **Mamíferos do Brasil.** Disponível em: <https://sbmz.org/mamiferos-do-brasil/>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- SATO, Y.; GODINHO, H. P. Migratory fishes of the São Francisco River. In: CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.; BAER, A. (Ed.). *Migratory fishes of South America: biology, fisheries, and conservation status.* Victoria: World Fisheries Trust/IDRC/World Bank, 2003. p. 199-232.
- SEBBEN, AUNB. 1996. **A Cartilha de Ofidismo.** Brasília: UNB, 36 p.
- SEGALLA, M. V. *et al.* List of Brazilian Amphibians. **Herpetologia Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 121-216. 2021.
- SILVA, J. M. C. Birds of the Cerrado Region, South América. **Steenstrupia** n. 21, p. 69 – 92, 1995.
- SILVA, W. R. **Bases para o Diagnóstico e o monitoramento da Biodiversidade de aves no Estado de São Paulo.** V. 6. Vertebrados. São Paulo: FAPESP, p 41-50. 1998.
- SILVA, J.F.; FARINÃS, M.R.; FELFILI, J.M. *et al.* Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography** 33: 536-548. 2006.
- SILVA, S. E. Efeito do uso do solo e estrutura do habitat na assembleia de peixes de riachos da bacia do rio Cuiabá, MT. 2010. 105 f. **Dissertação** (Mestrado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2010.
- SILVA, D. D. *et al.* Aspectos hidrológicos e ecoidrologia. In: SILVA, D. D. (org). **Conservação de solo e água, aspectos hidrológicos, ecoidrologia e usos múltiplos da água.** Viçosa: CRRH, 306 p., 2010.
- SILVA, K. M. P. *et al.* Reprodução de *Bothrops* spp. (Serpentes, Viperidae) em criadouro conservacionista. **Veterinária e Zootec.** 20(4):632–642. 2013.
- SIMON, M. F; PENNINGTON, T. Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. **Int J Plant Sci**, 173(6), 711-723. 2012.
- SNYDER, N. F. R. *et al.* **Parrots: status survey and conservation action plan 2000-2004.** IUCN, Glanz and Cambridge. 2000.
- SUZUKI, H. I.; AGOSTINHO A. A.; WINEMILLER. K. O. Relationship between oocyte morphology and reproductive strategy in locariid catfishes of the Paraná River, Brazil. **Journal of Fish Biology**, 57, 791-807. 2000.
- TEIXEIRA, W. *et al.* **Decifrando a Terra.** 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.
- TOLEDO, L. F. Anfíbios como Bioindicadores. In: **Bioindicadores da Qualidade Ambiental** (S. Neuman-Leitão & S. El-Dier, eds). Instituto Brasileiro Pró-Cidadania, Recife, p.196-208. 2009.

-
- TURNER, I. M. Species Loss in Fragments of Tropical Rain Forest: A Review of the Evidence. **Journal of Applied Ecology**, 33: 200-209, 1996.
- UMAPATHY, G.; KUMA, A. The occurrence of arboreal mammals in the rain Forest fragments in the Anamalai Hills, south India. **Biological Conservation**, 92: 311-319, 2000.
- VALDUJO, P. H.; RECORDER, R. S.; VASCONCELLOS, M. M. *et al.* Amphibia, Anura, São Desidério western Bahia uplands, northeastern Brazil. *Check List* 5(4):903-911, 2009.
- VALDUJO, P.H. Diversidade e distribuição de anfíbios no Cerrado: o papel dos fatores históricos e dos gradientes ambientais. **Tese (Doutorado)**, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- VALDUJO, P. H. *et al.* Anuran species composition and distribution patterns in brazilian Cerrado, a neotropical hotspot. **S. Am. J. Herpetol.**, 07(02): 63-78, 2012.
- VAN ROOY, P. T. J. C.; STUMPEL, A. H. P. Ecological impact of economic development on sardinian herpetofauna. **Conservation Biology**, 9:263-269, 1995.
- VAN ROOY, P. T. J. C.; STUMPEL, A. H. Ecological impact of economic development on sardinian herpetofauna. **Conservation Biology** 9:263-269. 1995.
- VAN SCHAIK, C. P.; GRIFFITHS, M. Activity periods of Indonesian rain forest mammals. **Biotropica**, 105-112. 1996.
- VERDADE, L. M. A exploração da fauna silvestre no Brasil: Jacarés, sistemas e recursos humanos. **Biota Neotrop.** 4(2):1-12, 2004.
- VERDADE, L. M.; LARRIERA, A.; PIÑA, C. I. **Broad-snouted Caiman Caiman latirostris. Crocodiles.** Status Surv. Conserv. Action Plan 18-22. 2010.
- VERDADE, V. K.; DIXO, M.; CURCIO, F. F. Os riscos de extinção de sapos, rãs e pererecas em decorrência das alterações ambientais. **Estud. Avançados** 24(68):161-172, 2010.
- WILLIS, E. O.; Y. ONIKI. Losses of São Paulo birds are worse in the interior than Atlantic forests. **Ciência e Cultura**, 44(5):326-328, 1992.
- WEYGOLDT, P. Changes in the composition of mountain stream frog communities in the atlantic mountains of Brazil: frogs as indicators of environmental deterioration? **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, 243: 249-255. 1989.
- YVES, A.; LIMA, L. M. C.; BASSETTI, L. A. B. *et al.* Illegal hunting in a protect area impacts on the broad-snouted caiman *Caiman latirostris* in the Rio Doce State Park, southeast Brazil. **Herpetol. Notes** 11765-768, 2018.
- ZUG, G. R.; VITT, L. J.; CALDWELL, J. P. Snakes. *In:* (Eds). **Herpetology**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 2001. p.503-595.

CAPÍTULO 5

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA NO CERRADO

Aziz Galvão da Silva Júnior

Resumo

A agricultura no Cerrado é responsável por 40% da produção agropecuária brasileira. Apesar de representarem somente 15% dos estabelecimentos rurais, os agricultores deste bioma geram 32% da renda agrícola bruta e contribuem com cerca da metade da produção de soja, milho e cana, 98% da produção de algodão e um terço do rebanho bovino do país. A grande disponibilidade de grãos viabilizou a implantação da avicultura e suinocultura moderna em larga escala e o Cerrado também tem participação importante na produção de café, banana, laranja, leite e até mesmo hortaliças. Além do impacto para a economia brasileira, a agricultura neste bioma tem papel significativo na segurança alimentar mundial. Sem a soja do Cerrado, os preços médios mundiais seriam 8,3% maiores, afetando diretamente os custos de produção de carne, leite e ovos nos países importadores de soja para ração animal. A importância atual da agricultura no Cerrado é o resultado de políticas públicas e programas de desenvolvimento, como o POLOCENTRO, PADAP e PRODECER, implementados pelo Governo Federal a partir da década de 1970 no âmbito do II PND (Plano Nacional de Desenvolvimento) do Governo Geisel. Os programas tiveram como base a disponibilização de crédito rural, pesquisas em fertilidade do solo e melhoramento genético vegetal, além do esforço de milhares de agricultores que migraram do sul do país para o Cerrado. Mesmo após o encerramento destes programas nos anos 1990 e 2000, novas áreas foram incorporadas à agricultura, principalmente nos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA), que passou a ser conhecido como MATOPIBA. O processo de desenvolvimento da agricultura do Cerrado, iniciado há cinco décadas, ainda está em curso. Por isto, conhecer a importância socioeconômica, histórico e impactos da ocupação da mais importante região agrícola do país é imprescindível para planejar o futuro e enfrentar o desafio de alimentar uma população crescente, e ao mesmo tempo, gerar renda e minimizar impactos ambientais.

5.1 Introdução

O agronegócio é o setor mais importante da economia brasileira, contribuindo com aproximadamente 25% do Produto Interno Bruto (PIB), 30% dos empregos e 40% das exportações. O Brasil é o maior produtor mundial de soja, café, suco de laranja e açúcar e, além da liderança na exportação destes produtos, também tem a maior parcela do mercado mundial de carne de frango e carne bovina (FAO, 2023). O conjunto das exportações agrícolas brasileiras representa cerca de 7,3% do total mundial. Em termos de volume de produção, os principais produtos são a cana de açúcar, soja, milho, leite e mandioca. Considerando o valor da produção, a soja ocupa o primeiro lugar, seguida da carne bovina, cana de açúcar, carne de frango e milho. Os valores disponibilizados pela FAO para 2021 são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Volume e valor da produção dos principais produtos do agronegócio brasileiro em 2021

PRODUÇÃO (milhões toneladas)		VALOR (bilhões de USD)	
Cana de Açúcar	715,7	Soja	51,6
Soja	134,9	Carne Boi	42,0
Milho	88,5	Cana de Açúcar	32,1
Leite	36,4	Carne Frango	28,1
Mandioca	18,1	Milho	17,8
Laranja	16,2	Leite	15,1
Carne Frango	14,6	Carne Suíno	8,7
Arroz	11,7	Café	6,3
Carne Boi	9,8	Laranja	5,3
Trigo	7,9	Algodão	5,1

Fonte: FAO (2023b).

Os produtores rurais brasileiros utilizam 257 milhões de ha (30,2%) dos 851 milhões de ha do território nacional. As pastagens ocupam 180 milhões de ha (21,2%) e a produção vegetal em lavouras e florestas plantadas cerca de 77 milhões de ha (9%). A porcentagem da área preservada no Brasil é 66%, sendo que 20,5% são áreas localizadas nas próprias propriedades rurais, equivalente a 175 milhões de ha (Santana, 2020b). Portanto, os produtores rurais preservam mais de duas vezes a área ocupada com agricultura ou uma área um pouco menor que toda a área de pastagens para a pecuária extensiva. Certamente os benefícios econômicos da preservação ambiental destas áreas são ainda maiores, mas utilizando um valor conservador do valor médio da terra no Brasil de R\$20.000/ha e a taxa alternativa de uso do capital equivalente ao rendimento da poupança (6%), o custo de oportunidade da área preservada pelos agricultores brasileiros é maior que R\$ 200 bilhões por ano.

A atividade agropecuária como qualquer atividade econômica impacta o meio ambiente através do uso de recursos naturais, da emissão de gases de efeito estufa, dos resíduos da produção e do uso de produtos químicos. Por ser uma atividade desenvolvida diretamente no meio ambiente, os impactos diretos do desmatamento, uso de água e aplicação de fertilizantes são mais evidentes. Em relação aos defensivos agrícolas, conforme dados de 2021 disponibilizados pela FAO, o Brasil ocupa o segundo lugar do total utilizado (377 mil t.), após os Estados Unidos (408 mil t.) e a frente da China (273 mil t.) e Argentina (241 mil t.). Entretanto, quando se considera o consumo por produção e área, o Brasil passa para a 8ª e 16ª posições, com respectivamente consumo relativo de 2,8 kg por tonelada de produto e 10,9 kg por ha (FAO, 2022). As condições da agricultura tropical de temperaturas mais elevadas e alta umidade são muito mais favoráveis para a propagação de pragas e doenças e para garantir altas produtividade e em muitas áreas duas safras, o uso de defensivos é imprescindível (Graziano, 2020).

A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) estima que atualmente 840 milhões de pessoas estão em situação de insegurança alimentar. Com o crescimento da população mundial até 2050, a produção de alimentos terá que crescer 50%. A preocupação com a segurança alimentar é uma prioridade atual e eventos históricos de

desabastecimento em larga escala de alimentos causados por instabilidade políticas, guerras ou fatores ambientais como o *Holodomor* (morte pela fome em Ucrâniano) na antiga União Soviética, a Grande Fome Chinesa e a Grande Fome na Irlanda continuam influenciando os formuladores de políticas públicas (Standage, 2009). Além da garantia de abastecimento, são cada vez maiores as exigências dos mercados em relação à qualidade, uniformidade e disponibilidade de alimentos durante todo o ano.

Considerando a posição do Brasil como produtor e exportador de importantes commodities agrícolas mostrada anteriormente, certamente causa surpresa saber que o Brasil também enfrentou, há pouco mais de seis décadas, diversas crises de abastecimento de alimentos. Conforme relatado por Neto (2011), a partir de 1952 ocorreram diversos problemas com a falta de produtos básicos como carne, arroz, feijão, leite, trigo e até mesmo açúcar. Em algumas cidades como Belo Horizonte e Fortaleza, a população em protesto depredou armazéns, açougues e invadiram prédios públicos. No Rio Grande do Sul, caminhões que transportavam carne foram atacados.

Estas crises foram causadas pelo início da industrialização no país que estimulava a urbanização e o êxodo rural, demandando mais alimentos de uma agricultura tradicional com baixos níveis de produtividade. O país importava alimentos e as famílias em média utilizavam cerca de 45% do rendimento para a alimentação. Além da produção de alimentos a preços baixos para alimentar a crescente população urbana, a agricultura deveria continuar, e mesmo aumentar, a geração de divisas através das exportações para viabilizar a indústria incipiente. Neste contexto, a modernização e expansão da produção agrícola tornaram-se prioridades e o Cerrado tornou-se o foco das ações governamentais.

5.2 Contextualização

5.2.1 Importância econômica da agricultura no Cerrado

O Cerrado ocupa 25% do território nacional. Os 204 milhões de ha do segundo maior bioma brasileiro estão distribuídos em 12 unidades federativas e 1.389 municípios. A região abriga nascentes de 8 das 12 principais bacias hidrográficas do Brasil, transformando o Cerrado no bioma estratégico para abastecimento hídrico do país. Cerca de 55% do bioma ainda está preservado e os 45% antropizados são ocupados por 60 milhões de ha em pastagens (29,5%), 25 milhões em culturas agrícolas (12%) e 3 milhões florestas plantadas (1,5%) de acordo com Bolfe (2020).

As 760 mil propriedades rurais localizadas no Cerrado representam apenas 15% do total brasileiro, mas contribuem com 40% da produção e geram 32% da renda do setor agropecuário. Cerca de 54% da soja, 49% do milho, 48% da cana e 98% do algodão são produzidos no Cerrado e o bioma é altamente relevante também para a produção de café, laranja, leite e até mesmo hortaliças como a cenoura. Na produção animal, o rebanho bovino do Cerrado representa $\frac{1}{3}$ do total brasileiro e a produção de grãos em grande quantidade na região viabilizou a implantação de projetos de granjas de aves e suínos modernos e de grande escala de produção. As áreas das principais culturas agrícolas temporárias e permanentes são mostradas no Quadro 2 (Santana, 2020b).

Quadro 2 - Áreas ocupadas pelas principais culturas agrícolas no Cerrado

ÁREAS CULTURAS TEMPORÁRIAS			ÁREAS CULTURAS PERENES		
	CULTURA	Mil ha		CULTURA	Mil ha
1º	Soja	17.244	1º	Café	365
2º	Milho	7.684	2º	Laranja	294
3º	Cana	4.968	3º	Banana	60
4º	Algodão	1.009	4º	Seringueira	15
5º	Feijão	797	5º	Limão	13

Fonte: Santana (2020b).

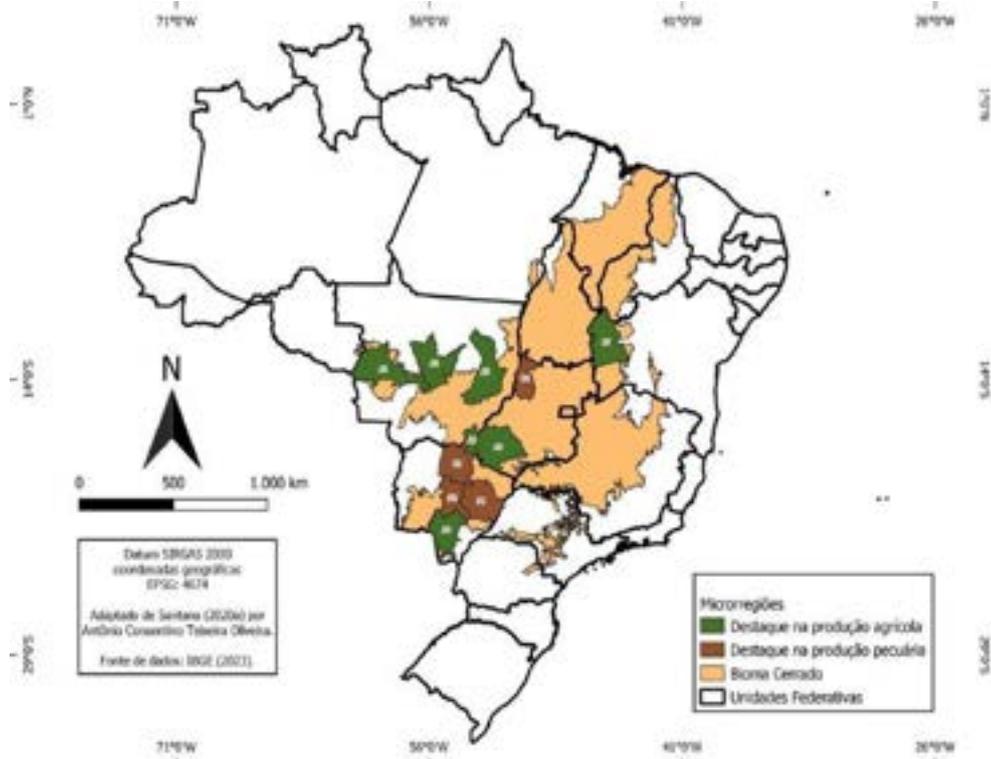
A cadeia de soja tem impacto significativo nos mercados mundiais de grãos, farelo e óleo. Cerca de 20% da soja em grãos, 9% do farelo e 9% do óleo mundiais são originados no Cerrado. Utilizando modelos econométricos, ITO (2019) calculou a elasticidade dos preços mundiais em relação à oferta destes produtos. Sem a produção de soja no Cerrado os preços da soja em grão aumentariam 8,28%, do farelo de soja 3,45% e do óleo 3,97%. Considerando o valor das importações do Japão, os autores concluíram que o preço mais baixo significou uma economia anual de US\$95,4 milhões de dólares para os consumidores japoneses. Além do benefício direto de diminuição nos preços dos produtos da soja, devem ser considerados também os impactos indiretos do uso de farelo na alimentação de aves e suínos. Mizobe (2014) calculou o impacto da produção de farelo de soja para a avicultura no Oeste da Bahia. O valor de R\$460 milhões em farelo contribuiu para que a cadeia de produção de aves gerasse R\$17,87 bilhões de reais nesta região, demonstrando que o valor agregado ao longo da cadeia é 40 vezes maior que o valor do farelo de soja. Impactos semelhantes também ocorrem na cadeia de produção de milho tanto para o mercado de rações quanto para o consumo humano e, em especial, ao longo da cadeia de produção de algodão. Em um estudo com dados da safra 2016/2017, o valor da produção agrícola brasileira de fibra e caroço de algodão, praticamente toda ela originada do Cerrado, era de US\$900 milhões. Considerando todos os produtos derivados do algodão como tecidos, ração animal, óleo vegetal e biocombustível, o valor gerado chega a US\$74 bilhões, ou seja, agrega-se ao longo da cadeia e em todas as regiões do país quase 80 vezes o valor da produção agrícola (ABRAPA, 2017).

Em relação a variáveis sociais, conforme dados apresentados por Santana (2020a), em 2010 cerca de 82% dos municípios do cerrado apresentaram alto ou médio níveis de desenvolvimento humano, um avanço muito expressivo considerando que em 1999 praticamente todos (99%) dos municípios tinham índices baixos ou muito baixos de IDH. Mesmo trabalhos críticos em relação ao desenvolvimento da agricultura no Cerrado reconhecem o avanço em indicadores como o IDH, os quais levam em consideração aspectos econômicos (PIB) e sociais como a taxa de alfabetização e a expectativa de vida (Lopes, 2021). Como em todas as regiões do Brasil, no Cerrado há grandes desigualdades entre grupos sociais e entre municípios. Santana (2020a) constatou, utilizando o índice GINI, que a concentração da renda bruta rural entre os 1.099 municípios do Cerrado é elevada e em média maior que 80%. O trabalho considerou diversos indicadores relacionados à saúde, infraestrutura (energia elétrica), educação, assistência técnica, demografia e meio ambiente. As diferenças entre as rendas brutas rurais foram explicadas por imperfeições de mercado e taxa de adoção de tecnologias.

Resultados semelhantes de concentração da produção nacional foram obtidos por Alves (2013) com base no Censo de 2006, que demonstrou que somente 500 mil das propriedades rurais brasileiras (11% do total) são responsáveis por 87% do valor da produção agrícola do país. Os trabalhos reforçam a importância da implementação de mecanismos efetivos que permitam aos agricultores de pequena e média escala obterem preços mais altos na venda da produção e preços mais baixos na compra de insumos. Outro aspecto destacado é o impacto positivo da assistência técnica na melhoria dos indicadores socioeconômicos da produção agrícola em pequena escala.

Apesar de relativamente homogêneo em termos de macroclima, fitofisionomia, solo e fauna, foram identificadas 19 ecorregiões¹ do Cerrado. As diferentes fisionomias e variáveis produtivas e socioeconômicas como população rural e urbana, pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários, utilização de tratores e área irrigada permitem realizar análises regionais. Com base nestes critérios, Santana (2020a) identificou as microrregiões com maior dinamismo entre as 110 microrregiões do Cerrado. Em relação a produção agrícola, destacaram-se: Sudoeste de Goiás, GO; Dourados, MS; Parecis, MT; Barreiras, BA; Alto Teles Pires e Canarana, MT. Em relação a produção de pecuária de corte os destaques são: Sudoeste de Goiás, GO; Alto Taquari, MS; Campo Grande, MT; Três Lagoas, MS e São Miguel do Araguaia, GO. As regiões são evidenciadas na Figura 1.

Figura 1 - Microrregiões de mais dinamismo da produção vegetal e animal no Cerrado



Fonte: Adaptado de Santana (2020a).

¹ Ecorregiões: 1. Alto Parnaíba, 2. Alto São Francisco, 3. Araguaia Tocantins, 4. Bananal, 5. Basaltos do Paraná, 6. Bico do Papagaio, 7. Chapada dos Parecis, 8. Chapadão do São Francisco, 9. Complexo Bodoquena, 10. Costeiro, 11. Depressão Cárstica do São Francisco, 12. Depressão Cuiabana, 13. Floresta de Cocais, 14. Jequitinhonha, 15. Paracatu, 16. Paraná-Guimarães, 17. Parnaguá, 18. Planalto Central e 19. Vão do Paranã.

A região de Cerrado no norte e nordeste do Brasil, abrangendo os estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA), é uma das principais fronteiras agrícolas no mundo e passou a ser conhecida como MATOPIBA. O crescimento e desenvolvimento da região levou o Governo a delimitar oficialmente a área através de um decreto presidencial em 2015, equivalente a 73 milhões de ha distribuídos em 337 municípios (Buainain, 2017). A soja é a principal cultura na região e ocupa 4,6 milhões de ha, produzindo 18,5 milhões de toneladas na safra 2022/23. Outro cultivo de grande importância é o algodão no Oeste da Bahia, responsável por cerca de 25% de toda a produção brasileira e produzido com alto nível tecnológico, o que garante altas produtividades e qualidade da fibra. Esta região é a mais consolidada do MATOPIBA, sendo referência tanto em nível tecnológico quanto na atuação das organizações que representam os agricultores. A Associação dos Irrigantes e Produtores Rurais da Bahia (AIBA) e a Associação Baiana dos Produtores de Algodão (ABAPA), além da representação política dos agricultores, implementam programas de grande impacto nas áreas de infraestrutura, preservação de recursos naturais, gestão dos recursos hídricos, controle fitossanitário, treinamento, ações sociais e apoio à produção de pequena escala (ABAPA, 2023).

Apesar de ocupar somente 8% da área plantada no Oeste da Bahia, a irrigação é uma tecnologia chave para diminuir o risco climático, aumentar a produtividade e viabilizar a segunda safra. Estudos recentes que avaliaram a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, os sistemas de manejo da irrigação e a governança dos recursos hídricos indicaram que a região tem potencial de ampliar a agricultura irrigada dos 200 mil ha atualmente para até 1,05 milhões de ha. Mesmo considerando possíveis impactos de mudanças climáticas, a área de expansão da irrigação poderia chegar a 840 mil ha, sem comprometer a disponibilidade de água para outros usos (Mantovani, 2021). O estudo também indicou as áreas críticas quanto à disponibilidade hídrica, cerca de 18% do total da região, nas quais a expansão da irrigação não seria sustentável e destacou a importância da implementação de um sistema de monitoramento dos recursos hídricos (Pousa, 2019).

O desenvolvimento econômico e o nível empresarial, organizacional e tecnológico dos agricultores no Oeste da Bahia têm contribuído para a diversificação das culturas e atraído novos investimentos. A conclusão da Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL), ligando as cidades Figueirópolis em Goiás a Ilhéus na Bahia, terá também impactos diretos no trecho que percorre esta região (Silva, 2022). Diversos investimentos e novos cultivos foram implementados. A implantação na região de um polo de produção de cacau, em especial, tem alto potencial para desenvolver economicamente não só a região, mas impactar a cadeia de produção de cacau do Brasil (Filho, 2021). A produtividade é 170% maior que a média nacional e as condições climáticas com clima seco diminuem o risco fitossanitário e contribuem para a melhoria da qualidade do produto. Cerca de 250 ha já estão instalados e empresas já disponibilizam mudas adaptadas à região. O desenvolvimento econômico atual do Oeste da Bahia e de todo o Cerrado é fruto de um processo histórico, concretizado por ações e iniciativas do poder público, empresas e produtores rurais.

5.3 Histórico da expansão da Agricultura no Cerrado

O surgimento da agricultura é um evento bastante recente na evolução de 150 mil anos da espécie humana. A domesticação de plantas e animais iniciada há cerca de 10 mil anos de forma paralela em alguns centros de origem como a Mesopotâmia, China e México permitiu a criação de cidades e transformou as relações sociais dos grupos humanos. A agricultura também

modificou completamente a relação do homem com a natureza através da intensificação da utilização de recursos naturais, abertura de áreas para cultivo e impactos na biodiversidade. Contrariando a visão mais comum, a comparação de evidências arqueológicas entre grupos nômades que sobreviviam da coleta e os primeiros agricultores sedentários, demonstrou que o surgimento da agricultura não pareceu uma “vantagem” (Standage, 2009). A análise das ossadas indicou que os nômades eram mais altos, tinham uma dieta mais rica e variada, apresentaram menos sinais de doenças e traumas, viviam mais e com base em análise de grupos nômades modernos, pode-se inferir que dispunham de muito mais tempo livre comparado com a rotina dos primeiros agricultores. Entretanto, grupos de nômades são necessariamente pequenos, ao passo que a agricultura gera excedentes de alimentos que permitiram o aumento da população, a criação de cidades e interações sociais mais intensas e complexas.

Durante séculos, a lenta evolução da produtividade agrícola em relação a uma população crescente transformou o abastecimento alimentar em uma prioridade e obrigou as civilizações a desbravarem novas regiões e expandir territórios. A busca por rotas alternativas para o comércio de especiarias incentivou as grandes navegações financiadas por Portugal e Espanha e posteriormente, França, Holanda e Inglaterra. Este intercâmbio mudou a história humana e interligou todos os continentes viabilizando um intenso fluxo de produtos agrícolas e animais, alterando os hábitos alimentares e a produção agrícola (Standage, 2009).

No novo continente a agricultura expandiu-se das áreas litorâneas para o interior com impactos econômicos, ambientais e sociais. Nos Estados Unidos, historiadores influenciados pelo trabalho de Turner (1893) destacam que, além dos impactos econômicos, a Conquista do Oeste forjou a própria cultura americana. A expansão da agricultura nas regiões de pradarias a partir de 1862 foi resultado de uma política de ocupação desta região, recém incorporada aos Estados Unidos, normatizada pelo “*homestead act*”. Esta iniciativa concedia áreas de cerca de 160 acres (65 ha) para colonos, a maioria imigrantes europeus, interessados em se estabelecer no meio oeste americano. O desenvolvimento da mecanização agrícola, as condições favoráveis para o cultivo do trigo e milho e o aumento da demanda mundial, permitiram o aumento da oferta de alimento e geração de riqueza que ajudaram a tornar os Estados Unidos a maior potência mundial. Entretanto, a catástrofe ambiental conhecida como “*Dust Bowl*” é um alerta para os riscos de expansão agrícola utilizando tecnologias inadequadas.

O “*Dust bowl*” foi resultado da erosão eólica causada por fatores naturais (secas, baixa umidade e ventos) combinada a ação humana nas pradarias do meio oeste americano. A utilização da aração profunda eliminou o sistema radicular das gramíneas naturais das pradarias. Com as severas secas dos anos 1934, 1936 e 1939-40, as sementes não germinaram e o solo manteve-se exposto à ação do sol e do vento. A decisão dos agricultores de preparar novamente o solo para novo plantio desagregou ainda mais o solo seco. Como consequência, nas grandes áreas agrícolas contínuas o efeito do vento provocou imensas nuvens de poeira que se deslocavam por grandes distâncias. Os efeitos ambientais e econômicos foram catastróficos na região e provocaram uma grande onda de migração nos USA. A resposta do Governo Americano foi eficaz, com a identificação de áreas de maior risco e a implementação de medidas para contenção e prevenção de erosão como o reflorestamento (McLeman, 2014).

No Brasil, as áreas afastadas do litoral eram conhecidas como os “grandes vazios”. O Governo de Getúlio Vargas, durante o Estado Novo (1937 e 1945), promoveu a campanha “Marcha para o Oeste” como forma de povoar as regiões Norte e Centro Oeste. A campanha propunha integrar estas regiões através da expansão da agricultura (Cassiano, 2002). Apesar do

surgimento de centros urbanos e aumento da malha rodoviária, os impactos desta iniciativa foram insuficientes para alterar a distribuição da população e aumentar a produção agrícola nestas regiões.

A partir dos anos 1970, no âmbito do II PND (Plano Nacional de Desenvolvimento Econômico) do Governo do General Geisel (1974-1979), diversos programas foram implementados. A importância atual da agricultura do cerrado e as transformações da região em termos econômicos e sociais são o resultado destas iniciativas (Faria; Zamberlan, 2013). Estes programas tinham como fundamento a concessão de crédito, mas só puderam ser concretizados a partir de três outros elementos fundamentais:

- pesquisas em fertilidade do solo,
- melhoramento genético da soja e
- migração de agricultores do sul do Brasil

No Cerrado predominam os latossolos, que são geologicamente antigos e caracterizados por elevada acidez ativa, alta concentração de alumínio (Al^{3+}) tóxico às plantas e baixos teores de nutrientes como fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Estes solos são profundos e localizam-se normalmente em área de relevo relativamente plano, permitindo a mecanização. Entretanto, por apresentarem baixa fertilidade e alto nível de toxicidade inviabilizavam a produção agrícola nas formações de campo e cerrado no sentido restrito.

As áreas esparsas de formação de mata no Cerrado eram utilizadas desde o período colonial para a agricultura utilizando-se o mesmo modelo de exploração da Mata Atlântica. A derrubada e queima da vegetação nativa, além de viabilizar as operações agrícolas, disponibiliza nutrientes nos anos iniciais. Entretanto, após alguns anos de cultivo, o modelo mostrava sinais de esgotamento com queda da produtividade em função da diminuição da fertilidade e degradação do solo pela erosão. A tentativa de recuperação das áreas de café degradadas por este sistema em São Paulo no Bioma Mata Atlântica foi essencial para o avanço das pesquisas sobre fertilidade do solo no Cerrado.

Um acordo em 1951 entre o Brasil e o IRI - *Research Institute* dos Estados Unidos viabilizou a vinda de agrônomos americanos para recuperarem as áreas cafeeiras do interior de São Paulo. Apesar dos resultados positivos obtidos na Estação de Pesquisa do Instituto Agrônomo em Matão, a produtividade não atingiu os níveis esperados, principalmente quando comparado com as áreas recém-abertas do Norte do Paraná (Silva, 2018). Mesmo com resultados insatisfatórios o acordo teve continuidade.

Em 1955, o agrônomo americano Andrew McClung, integrado à equipe no Brasil, implantou experimentos em áreas de Cerrado em São Paulo e Goiás. Nestes experimentos, determinou-se as doses adequadas de calcário para eliminar a toxidez do Al^{3+} , o fornecimento de Ca^{2+} , Mg^{2+} e de NPK (McClung *et al.*, 1958). Figueiredo (2016) descreve outros experimentos fundamentais que permitiram a consolidação de tecnologias para a construção da fertilidade do solo no Cerrado e expansão da agricultura. Cultivos adequados à mecanização, rentáveis e com mercado internacional eram prioritários. A cultura da soja atendia a todos estes critérios, além de permitir redução no custo de adubação através da fixação biológica do nitrogênio.

Atualmente, a soja é a cultura mais importante na agricultura do Cerrado. Essa leguminosa domesticada na China por volta de 7.000 A.C., passou a ser cultivada como forrageira nos Estados Unidos por volta de 1870. No século XX, o químico americano George W. Carver

descobriu o valor da proteína e do óleo de soja. A prosperidade dos anos pós-guerra e o consequente aumento do consumo de carne, leite e ovos, transformaram a soja em um componente essencial para ração animal e impulsionou a expansão da soja no meio oeste americano (Norberg; Deutsch, 2023). No Brasil, a soja foi introduzida em 1882 na Bahia e posteriormente cultivada por descendentes de japoneses em São Paulo. Somente em 1914 foram introduzidas no Rio Grande do Sul variedades americanas e a partir dos anos 40 a cultura se consolidou no estado. Acordos de cooperação entre o Brasil e os Estados Unidos viabilizaram a introdução de novas variedades e a cultura da soja expandiu-se no Rio Grande do Sul e também no Paraná (Silva 2018). Entretanto, a expansão da soja para a região do Cerrado com variedades destas regiões não era possível.

A soja é uma cultura sensível ao fotoperíodo, com o florescimento induzido por dias curtos e o florescimento antecipado ou tardio que ocorre quando uma variedade é plantada fora da sua faixa de latitude adequada reduz a produtividade. A maior parte da produção de soja ocorre em latitudes maiores que 30° norte, como no centro de origem da cultura na China e nos Estados Unidos, o que equivale ao Rio Grande do Sul no hemisfério sul (Silva, 2022b). O principal desafio para a expansão da soja no Cerrado, era o desenvolvimento de variedades adaptadas a baixas latitudes (menores que 20°). A “soja tropical” é certamente um dos maiores êxitos da pesquisa agropecuária brasileira. Centros de pesquisa e universidades criaram programas de melhoramento de soja nos anos 60 e a Universidade Federal de Viçosa (UFV) implantou o Programa Soja em 1966 a partir de material disponibilizado pela Universidade Gainesville da Flórida. Nos anos seguintes, foram lançadas as variedades Mineira e Viçosa. A identificação de uma variedade mutante da Viçoja originou a variedade UFV-1, que se tornou na década de 1970 até meados dos anos 1980, a variedade mais plantada na região do Cerrado. No município de Cristalina, o Agrônomo Francisco Teresawa identificou um cruzamento natural entre a UFV-1 e a variedade Davis denominada FT-Cristalina, a qual no final da década de 80 expandiu-se por 3,5 milhões de ha (Sediyama, 2015). A criação da Embrapa e os trabalhos do IAC impulsionam o desenvolvimento de variedades de soja mais produtivas, resistentes a pragas e doenças e adaptadas a todas as regiões do país. Em 1996 foi introduzida nos Estados Unidos a primeira variedade transgênica pela Monsanto, com gene resistente ao herbicida glifosato. As plantas conhecidas como soja RR (*roundup ready*), viabilizaram o controle de ervas daninhas e o consequente aumento da produtividade, além da diminuição de custos, otimização do uso de insumos e, por viabilizaram o plantio direto, a conservação do solo. Atualmente, empresas de pesquisa e principalmente grandes empresas do agronegócio, comercializam diversos genótipos com características de resistência a insetos, tolerância à seca, maior conteúdo e qualidade de óleo.

Com a disponibilização de crédito, investimentos em infraestrutura de transporte e armazenamento, a solução do problema de fertilidade do solo e o desenvolvimento de variedades de soja adaptadas a baixas latitudes faltava o elemento mais importante para a expansão da agricultura no Cerrado, os agricultores. Sem empreendedores capazes e dispostos a enfrentarem a incerteza da produção em uma região desconhecida, o Cerrado ainda hoje não teria o papel chave na agricultura e economia brasileiras.

Para os formuladores dos programas governamentais, os agricultores do sul do Brasil foram considerados os candidatos ideais. Descendentes majoritariamente de imigrantes italianos, alemães e japoneses, compartilham princípios e valores essenciais para o desenvolvimento econômico de uma região, como a importância da ascensão social através do

trabalho árduo (Silva, 2018). A disponibilidade de assumir riscos era reforçada pela falta de alternativas de expansão no sul do país, pois a partilha das propriedades em um número crescente de descendentes inviabilizava o crescimento econômico do empreendimento rural.

Diversos programas e iniciativas que viabilizaram direta ou indiretamente a ocupação do Cerrado foram implementadas ao longo dos anos 70 até meados dos anos 80. Os mais relevantes são apresentados a seguir:

- 1972: Programa de Crédito Integrado e Incorporação dos Cerrados (PIC);
- 1973: Programa de Assentamento Dirigido do Alto Paranaíba (PADAP);
- 1973 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA);
- 1974 Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMBRATER);
- 1975 Programa de Desenvolvimento do Cerrado (POLOCENTRO);
- 1975: Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL);
- 1979: Programa de Desenvolvimento do Cerrado (PRODECER);
- 1981: Programa Nacional de Aproveitamento Racional de Várzeas (PROVÁRZEAS);
- 1982: Programa de Financiamento de Equipamentos de Irrigação (PROFIR), e
- 1984: Programa de Desenvolvimento Integrado da Bacia do Araguaia-Tocantins (PRODIAT).

O Programa de Assentamento do Alto Paranaíba (PADAP) foi o projeto pioneiro de colonização no Cerrado Brasileiro. Ações conjuntas dos Governos Estadual e Federal desapropriaram cerca de 60 mil ha nos municípios de São Gotardo, Rio Paranaíba, Ibiá e Campos Altos, grande parte (20 mil ha) pertencente a um único latifundiário, o empresário Antônio Luciano Pereira Filho. O projeto contou com crédito do Programa de Crédito Integrado e Incorporação do Cerrado (PIC) através do Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (BDMG). Nesta iniciativa, a Cooperativa Agrícola de Cotia - Cooperativa Central (COTIA-CC) desempenhou papel fundamental. A COTIA foi criada em 1927 na cidade de mesmo nome em São Paulo por um grupo de 70 produtores e teve rápido crescimento econômico, expandindo-se para outras regiões, entre elas o Norte do Paraná. Produtores desta região foram selecionados pela COTIA em função conhecimento técnico e interesse e necessidade de migrarem, pois com a substituição do café após as seguidas geadas nesta região por cultivos de grãos que demandavam áreas maiores e menor força de trabalho, diminuíram as possibilidades de crescimento econômico das propriedades de menor porte desta região.

A área do projeto PADAP foi dividida em 95 lotes e a COTIA implantou estrutura de armazenamento e passou a atuar também no crédito e na comercialização da produção. Inicialmente, as principais atividades agrícolas implantadas em termos de área foram a soja, com 75%, seguida de milho (13%) e café (12%). Diferentemente de outras regiões do Cerrado, a região diversificou fortemente a produção, com a introdução da olericultura em grande escala, com destaque para os cultivos de alho, cebola e especialmente cenoura (Santos *et al.*, 2013). Com o desenvolvimento da variedade de cenoura Brasília e a implantação da irrigação no âmbito do programa PROFIR, a região tornou-se a maior produtora desta olerícola, abastecendo 40% do mercado brasileiro.

O Programa de Desenvolvimento da Região Centro Oeste (POLOCENTRO) foi um programa implementado em 1975 com o objetivo de diminuir disparidades regionais através do estímulo ao investimento e políticas de apoio para o crescimento econômico. O total investido no programa em 202 municípios foi de US\$750 milhões em valores de meados da década de 70, o que equivale a US\$4,7 bilhões a preços atuais (Pires, 2020). A ampla disponibilização de crédito rural subsidiado foi o instrumento mais importante para atrair investimentos e viabilizar a expansão da produção. O crédito rural para custeio, investimento e comercialização era normatizado através do Sistema Nacional de Crédito Rural, instituído na década anterior (1965). Outros instrumentos de política pública, como a pesquisa e investimento em infraestrutura também foram fundamentais para o sucesso do programa. A EMBRAPA, Instituições de Pesquisa Estaduais (EPAMIG, EMGOPA, EMPA-MT) e Universidades, além das pesquisas em fertilidade do solo e melhoramento genético comentadas anteriormente, desenvolveram trabalhos fundamentais nas áreas de manejo fitossanitário, mecanização, armazenagem e irrigação. Estas tecnologias foram difundidas através de Empresas de Assistência Técnica (EMATER) estaduais, que faziam parte do sistema nacional EMBRATER (Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural). A construção e pavimentação de estradas e expansão do número de armazéns e silos permitiram o escoamento e o armazenamento da produção.

Após os resultados iniciais do PADAP e as ações do POLOCENTRO, o Governo Brasileiro implementou em 1979 o mais importante programa para a expansão da agricultura no Cerrado, o Programa de Desenvolvimento do Cerrado (PRODECER). O programa foi resultado da Cooperação entre o Brasil e o Japão. Este país, altamente dependente da importação de alimentos, tinha interesse estratégico em ampliar a oferta mundial (ITO, 2019). O Cerrado foi considerado uma região prioritária e, a partir de 1974, tiveram início a concepção e planejamento do programa coordenados pela Agência Japonesa de Cooperação (JICA). Em 1978 foram criadas duas holdings a japonesa JADECO (*Japan-Brazil Agricultural Development Corporation*) e a brasileira BRASAGRO (Companhia Brasileira de Participação Agroindustrial), as quais constituíram uma joint venture a CAMPO (Companhia de Promoção Agrícola). A CAMPO coordenava a indicação de cooperativas, seleção de agricultores, elaboração de projetos técnicos e assistência técnica (JICA, 2023; JICA, 2002a). O PRODECER foi implementado em três etapas:

- PRODECER I, 1979 a 1983;
- PRODECER II, 1985 a 1993, e
- PRODECER III, 1995 a 2001.

Os resultados do PADAP influenciaram fortemente a concepção e execução da primeira etapa do programa entre 1979 e 1983, implementado nos municípios de Coromandel, Mundo Novo, Iraí de Minas e Entre Ribeiros no Oeste de Minas Gerais. Em uma área de 60 mil ha foram assentadas 92 famílias que receberam lotes de 250 a 500 hectares. Os agricultores estavam organizados em cooperativas (COTIA, COSUEL e COOPERVAP) e associações. Nesta fase também foram criadas empresas agrícolas de grande porte e uma unidade de produção de semente da própria CAMPO (Santos, 2016).

Na fase II, entre 1985 e 1993, o programa ampliou a atuação incluindo áreas da Bahia, Mato Grosso do Sul, Goiás e Mato Grosso. Quatro projetos em área com condições favoráveis foram implementados na Bahia (Formosa do Rio Preto na Bahia) e Mato Grosso (Lucas do Rio Verde e Tapurah) compreendendo uma área de 67 mil ha. Paralelamente a estes projetos, foram

acrescidos 11 projetos nos municípios mineiros de Paracatu, Bonfinópolis, Formoso e Buritis com área total de 130 mil ha. Apesar da situação econômica do país ser desfavorável, com altíssimas taxas de inflação, o programa continuou a oferecer linhas de crédito com taxas vantajosas, assistência técnica e melhoria de infraestrutura física e apoio à comercialização (Santos, 2016). Nesta etapa expandiu-se a tecnologia de irrigação e, atualmente, o Cerrado representa 60% da área irrigada do Brasil (Rodrigues, 2023).

A terceira fase do programa ocorreu entre 1995 e 2001 com foco nos estados de Tocantins e Maranhão em projetos que envolveram cerca de 40 produtores em uma área total de 40 mil ha nos municípios de Pedro Afonso, TO e Balsas, MA. Nesta etapa os custos por propriedade foram maiores que nas fases anteriores (Rodrigues, 2009).

Ao longo das três fases do programa, o PRODECER recebeu investimentos da ordem de US\$ 680 milhões dos governos brasileiro e japonês. Foram incorporados ao sistema produtivo 345 mil hectares através de 21 projetos em 8 estados brasileiros e beneficiados 758 produtores organizados em 17 cooperativas (JICA, 2002b). O programa viabilizou também a capacitação de técnicos brasileiros do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados). Considerando a área atual ocupada pela agricultura no cerrado de cerca de 24 milhões de ha, os projetos do PRODECER correspondem a menos de 2% desta área. Entretanto, o PRODECER serviu como base para outros projetos, e contribuiu para o desenvolvimento de pesquisa e difusão de tecnologia para toda a região. Uma avaliação conjunta realizada pela Agência Japonesa de Cooperação (JICA) e o Ministério da Agricultura do Brasil em 2002 concluiu que os resultados diretos (aumento da produção agrícola e implantação de infraestrutura de produção e escoamento) e os indiretos (aumento da oferta global de alimentos e impacto na economia nacional) esperados foram alcançados.

O número de produtores beneficiados diretamente por estes programas representa uma pequena parcela do total dos produtores rurais do Cerrado. Como já destacado anteriormente, os benefícios dos investimentos em infraestrutura e pesquisa foram apropriados pelos agricultores que passaram a adotar tecnologias modernas e o efeito demonstrativo foram fundamentais para a expansão da agricultura no Cerrado. Os impactos sociais e ambientais desta expansão são amplamente discutidos criticamente nos meios de comunicação e no meio acadêmico (Barros, 2021), nos quais o próprio conceito de desenvolvimento é questionado (Lopes, 2021). Muitos destes trabalhos utilizam depoimentos de lideranças e produtores que questionam os benefícios da expansão da agricultura. Por outro lado, é possível também abordar o desenvolvimento e os impactos positivos, mensurados por indicadores socioeconômicos como o IDH, a partir da experiência e visão dos agricultores que migraram do sul do Brasil para o Cerrado. Sant’anna (2019) discute as experiências dos imigrantes japoneses na região de Paracatu e as experiências dos gaúchos são discutidas por Kaiser (1999).

O depoimento do Eng. Agrônomo, produtor, pesquisador e consultor Celito Breda do Oeste da Bahia demonstra a importância da pesquisa e os esforços dos agricultores na expansão da agricultura no Cerrado. A “paixão” pela atividade e vontade de resolver problemas são destacadas como condição para vencer o desenvolvimento da agricultura. O depoimento deste produtor certamente reflete, em linhas gerais, a história de milhares de outros agricultores e suas famílias. Sem eles não existiria agricultura no Cerrado (Canal Rural, 2023; Tooge, 2020).

5.4 Considerações finais

Os impactos econômicos e a melhoria de indicadores sociais da expansão da agricultura no Cerrado são incontestáveis. Esta região tem importância chave para a economia brasileira e os alimentos produzidos para o consumo humano e ração animal têm impacto significativo em nível mundial. Entretanto, a região, como o restante do país, ainda tem altos índices de desigualdade social e diferenças entre as regiões, com microrregiões de grande dinamismo ao lado de regiões com crescimento lento. Distribuir os benefícios do crescimento econômico de forma equitativa para todos é a questão básica da economia. Mesmo assim, a humanidade, a partir dos anos 1970 percebeu a importância da sustentabilidade, que conceitualmente pode ser entendida como a distribuição equitativa dos benefícios econômicos entre a geração atual e a geração futura. O desafio é imenso, pois mesmo não resolvendo a questão distributiva atual, a humanidade precisa preservar os recursos naturais para garantir que as gerações futuras tenham as mesmas condições de atenderem as suas necessidades. A alimentação é uma necessidade e direito básico e o desenvolvimento da agricultura é imprescindível para atender a demanda de uma população crescente e, ao mesmo tempo, preservar os recursos naturais para as próximas gerações. Os agricultores do Cerrado continuarão a desempenhar um papel vital para enfrentarmos este desafio.

Referências

- ABAPA - Associação Baiana dos Produtores de Algodão. 2023. Disponível em: <https://abapa.com.br/>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- ABRAPA - Associação Brasileira dos Produtores de Algodão. **A cadeia do algodão brasileiro, safra 2016/2017: desafios e estratégias**. Brasília: ABRAPA. 2017.
- AIBA - Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia. 2023. Disponível em: <https://aiba.org.br/>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- ALVES, E.; SOUZA, G. S.; ROCHA, D. P. Desigualdade nos campos na ótica do Censo Agropecuário. **Revista de Política Agrícola**, 22 (2), 67-75. 2006.
- ALVES, E. A.; SOUZA, G. S.; GOMES, E. G. **Contribuição da Embrapa para o desenvolvimento da agricultura no Brasil**. Editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa. 2013.
- BARROS, P. H. B.; STEGE, A. L. Socio economic Development and Deforestation in the Cerrado Biome, Brazil: Spatial Interactions and Heterogeneity. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, 3(15): 393-415, 2021.
- BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília: Embrapa. 2020.
- BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. **Dinâmica da economia e da agropecuária no Matopiba**, Texto para Discussão, N.º. 2283, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília. 2017.
- CANAL RURAL. **O agricultor deve ter paixão, porque aí ele tem vontade de resolver os problemas**. 2023. Youtube, 24 de julho de 2023. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=JR-X0n6lEg0>. Acesso em: 14 dez. 2023.

CASSIANO, L. C. *Marcha para Oeste: um itinerário para o Estado Novo (1937- 1945)*. 2002. **Dissertação** (Mestrado em História) UnB, Brasília. 2002.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Pesticides use, pesticides trade and pesticides indicators – Global, regional and country trends, 1990–2020**. FAOSTAT Analytical Briefs, no. 46. Rome. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization. **The State of Food and Agriculture 2023. Revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Rome. 2023a.

FAO - Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT: Commodity by countries**. 2023b. Disponível em https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country. Acesso em: 14 dez. 2023.

FARIA, G. M.; ZAMBERLAN, C. O. Expansão da fronteira agrícola: impactos das políticas de desenvolvimento regional no Centro-Oeste brasileiro. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento** 2(2). 2013.

GRAZIANO, X.; GAZZONI, D. L.; PEDROSO, M. T. **Agricultura: Fatos e Mitos**. Ed. Baraúnas: São Paulo. 2020.

FIGUEIREDO, Y. C. A fertilidade do solo no Cerrado: Os pioneiros da pesquisa e o papel da cooperação internacional. **Monografia**. Universidade de Brasília. 2016.

FILHO, Z. 2021. **Diversificação de culturas fomenta o desenvolvimento do Oeste Bahia**. AIBA Rural.

ITO, S.; QIAN, J.; HASSANZOY, N. Economic and Social Impacts of Cerrado Agriculture: Transformation for Inclusive Growth Through Clusters and Value Chains. **Fac. Agr. Kyushu Univ.**, v. 64, n. 2, p. 367-378, 2019.

JICA. **O PRODECER (Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para o Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados)**. 2023. Disponível em: <https://www.jica.go.jp/brazil/portuguese/office/publications/c8h0vm000001w9k8-att/prodecer.pdf>. Acesso em: 20 dez.2023.

JICA. **Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados: Estudos de Avaliação Conjunta**. Relatório Geral. 2002a. Disponível em: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11685989_01.PDF. Acesso em: 20 dez.2023

JICA. Avaliação do PRODECER. *In: Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados: Estudos de Avaliação Conjunta*. Relatório Geral. 2002b. Disponível em: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11685989_11.PDF. Acesso em: 20 dez. 2023.

KAISER, J. *Ordem e Progresso: o Brasil dos Gaúchos*. **Tese Mestrado UFSC**. 1998.

LOPES, G. R.; LIMA, M. G. B.; REIS, T. N. P. **Revisitando o conceito de mau desenvolvimento: Inclusão e impactos sociais da expansão da soja no Cerrado do Matopiba**. *World Development* 139. 2021.

LOPES, I. V.; LOPES, M. de R. O fim das cinco décadas de tributação da agricultura no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 19, edição Especial, p. 31-41, 2010.

-
- McLEMAN, R. A.; DUPRE, J.; FORD, L. B. *et al.* What we learned from the Dust Bowl: lessons in science, policy and adaptation, **Popul Environ** (214) 35:417-440. 2014.
- MANTOVANI, E. C.; COSTA, M. H.; MARQUES, E. *et al.* **Relatório Técnico: sistema integrado de inteligência territorial para gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Oeste da Bahia.** AIBA. 2021.
- MCCLUNG, A. C.; MARTINS DE FREITAS, L. M.; GALLO, J. R. *et al.* Alguns estudos preliminares sobre possíveis problemas de fertilidade em solos de diferentes campos cerrados de São Paulo e Goiás. **Bragantia** 17(3): 31-44. 1958.
- MIZOBE, T. 2014. Value Chain of Soybean Products in the Brazilian Cerrados: Value Expansion Process from Soybean Products to Chicken. **Journal of Agricultural Development Studies** 25 (1): 47–53.
- NETO, S. L. **Modernização, crise e protesto popular: a questão do abastecimento nos anos 50.** Anais do XXVI Simpósio Nacional de História – ANPUH • São Paulo, julho 2011. 2011.
- NORBERG, M. B.; DEUTSCH, L. 2023. *The soybean through world history: Lessons for sustainable agrofood systems.* Routledge: Oxon.
- PIRES, M. O. ‘Cerrado’, old and new agricultural frontiers. **Bras. Political Sci. Rev.** 14 (3). 2020.
- POUSA, R.; COSTA, M.H.; PIMENTA, F.M. *et al.* Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring. **Water**, 11, 933, 2019.
- RODRIGUES, L. N. **Agricultura irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável.** Embrapa: Brasília. 2023.
- RODRIGUES, W.; VASCONCELOS, S. J.; BARBIERO, A. K. 2009. Análise da efetividade socioeconômica do PRODECER III no município de Pedro Afonso, Tocantins. **Pesq. Agropec. Trop., Goiânia**, v. 39, n. 4, p. 301-306, 2009.
- SANT’ANNA, N. R. Comunidade nikkei de Paracatu-MG e suas experiências de desenvolvimento no contexto do Prodecer. **Estudos Japoneses**, (41), 61-77, 2019.
- SANTANA, C. A. M.; SOUZA, G. S.; CAMPOS, S. K. *et al.* **Dinâmicas agropecuárias e socioeconômicas no Cerrado, de 1975 a 2015.** in BOLFE, E. L., SANA, E. E., CAMPOS, S. K. (ed.) In: *Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções* Brasília, DF: Embrapa, 2020a.
- SANTANA, C. A. M.; CAMPOS, S. K.; MARRA, R. *et al.* **Cerrado Pilar da agricultura brasileira.** In: BOLFE, E. L., SANA, E. E., CAMPOS, S. K. (Ed.), *Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções* Brasília, DF: Embrapa, 2020b.
- SANTOS, C. C. M. O espírito do capitalismo na ocupação dos cerrados brasileiros nos estados da Bahia e do Piauí. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)** 8: 229-253, 2015.

SANTOS, C. C. M. Programa de cooperação Nipo-Brasileira para o desenvolvimento dos Cerrados - PRODECER: um espectro ronda os cerrados brasileiros. **Estudos Sociedade e Agricultura**, 24(2): 382-416, 2016.

SANTOS, M. A.; BARBIERI, A. F.; MACHADO, C. J. *et al.* Programa de Assentamento Dirigido do Alto Paranaíba: O marco inicial do processo de ocupação do Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Educação e Cultural**, 8: 17-43, 2013.

SEDIYAMA, T. **Melhoramento genético da soja**. Ed. Mecenas. 2015.

SILVA, C. M. S. Entre Fênix e Ceres: a grande aceleração e a fronteira agrícola no Cerrado. **Vária História**, 34(65): 409-444, 2018.

SILVA, C. C.; BAIARDI, A. Desenvolvimento Territorial com preceitos de sustentabilidade no trajeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste – FIOL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, 2022a.

SILVA, F.; BORÉM, A.; SEDYAMA, T. *et al.* **Soja: do plantio a colheita**. Oficina de Textos: São Paulo. 2022b.

STANDAGE, T. **An edible history of humanity**. Bloomsbury: Nov York. 269p. 2009.

TOOGE, R. **Gente do campo: pesquisa e insistência fizeram agricultor se tornar referência na produção de feijão no oeste da Bahia**. 2020. G1 Globo, 30 de junho de 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/agro-a-industria-riqueza-do-brasil/noticia/2020/06/30/gente-do-campo-pesquisa-e-insistencia-fizeram-agricultor-se-tornar-referencia-na-producao-de-feijao-no-oeste-da-bahia.ghtml>. Acesso em: 14 dez.2023.

TURNER, F. J. The Significance of the Frontier in American History. **Annual Report of the American Historical Association**, (1893): 197-227, 1893.

CAPÍTULO 6

USO E OCUPAÇÃO DO SOLO, IMPACTOS E IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Jorge da Silva Júnior
Francisco Assis de Oliveira

Resumo

O Cerrado surgiu há cerca de 65 milhões de anos, é o segundo maior Bioma da América do Sul e do Brasil, ocupa 22% do território nacional, com cerca de 2.036.448 km², atrás apenas do Bioma Amazonas. É constituído por diversos tipos de solos, desde a classe dos Neossolos, que são solos jovens aos Latossolos, solos velhos altamente intemperizados (Goedert, 1985; Embrapa - SiBCS, 2018). Cerca de 46% dos solos desse Bioma são constituídos por Latossolos e cobrem uma área total de cerca de 39% do Brasil, muitos evoluídos pedogeneticamente, possuem perfis homogêneos, porosos, bem drenados, profundos (≥ 2 m), sua parte sólida é constituída por uma fração mineral e outra orgânica. Esses solos presentes em grande parte da área produtiva do oeste baiano, possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e de saturação por bases (V), teor elevado do alumínico trocável, fortemente ácidos e baixa fertilidade natural (Embrapa-SiBCS, 2018). São áreas com deficiências generalizadas dos nutrientes essenciais as plantas, e na grande maioria dos cerrados, os Latossolos, possuem áreas de baixa fertilidade natural e acidez elevada, por conta da presença do alumínio (Al^{3+}) e hidrogênio (H^+) na solução, e do baixo teor de matéria orgânica (~1%), que em consequência das condições climáticas, ocorre a lixiviação dos cátions de caráter básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ . Tornando-se necessário a aplicação de corretivos da acidez e da fertilidade do solo no sentido de atender as exigências das culturas para atingir os patamares de produtividades preconizados. Essas áreas são de fáceis manejos agrícolas que submetidas ao efetivo processo produtivo através das agriculturas tradicional, convencional e ecológica, nos mais variados níveis tecnológicos, respondem atualmente pela grande maioria da produção de grãos e fibras no país. Com a evolução da agricultura brasileira, principalmente nas últimas três décadas, nem sempre a sustentabilidade da produção agrícola, como visão de futuro, tem sido o objetivo principal. Reverter o quadro de degradação de extensas áreas agrícolas no mundo inteiro (FAO, 2023), deve ser compromisso normativo dos atuais produtores em aperfeiçoar o uso do solo e da água com potencial para fomentar a produção agrícola e contribuir para a mitigação de impactos ambientais. Buscar no paradigma da sustentabilidade ambiental, social e econômica e assim, assegurar a sobrevivência das gerações futuras. A adoção de boas práticas agrícolas focadas no caráter edáfico, mecânico e vegetativo, com fundamentos conservacionistas do solo e da água são pré-requisitos para a sustentabilidade da agricultura nas áreas de cerrados. O plantio direto na palhada atualmente limitado a um pequeno grupo seletivo de produtores é a única prática capaz, de num espaço de tempo relativamente curto, corrigir os baixos teores de matéria orgânica dos Latossolos e assim melhorar substancialmente a CTC e a fertilidade dessas áreas. É imperativo a expectativa que os lucros financeiros auferidos pela produção agrícola no presente possa buscar ser a porta para futuras soluções e contribuir para redução da miséria e a fome das populações no planeta Terra.

6.1 Introdução

O Cerrado possui as formas de ambientes mais antigas da história recente do planeta Terra a se estruturar no continente americano. Surgiu em algum momento do período Cretáceo Superior, mas foi no Terciário Médio, há mais ou menos 60 a 65 milhões de anos, que ele começou a desenvolver o estoque genético que lhe deu a conformação atual que conhecemos. Portanto, o Cerrado existe há cerca de 65 milhões de anos, porém na visão da Escala do Tempo Geológico que registra os grandes eventos da história do planeta Terra, esse bioma é uma formação Geológica recente, constituído pelo complexo cristalino e bacias sedimentares, com rochas variadas. Apesar do cerrado já existir, no mínimo, há cerca de 65 milhões de anos, ele se concretizou há cerca de 40 milhões de anos (Barbosa, 2014).

Esse bioma ocupa grande parte do Brasil, e se faz presente nos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Piauí, Tocantins, Paraná, Rondônia, Distrito Federal, São Paulo e Minas Gerais, além dos enclaves em pontos da Amazonas, Amapá e Roraima. É o segundo maior Bioma da América do Sul e do Brasil, ocupando 22% do território nacional em uma área total, com cerca de 2.036.448 km² (Goedert, 1985), atrás apenas do Bioma Amazonas que abrange uma área de 5.015.146,008 km², correspondendo cerca de 60% do território brasileiro. Nesse espaço territorial encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul: bacia Amazónia, bacia do Tocantins e bacia do São Francisco. Nessa última está situado o aquífero Urucuaia, que alimenta uma grande variedade de solos, biodiversidades e de clima com um elevado potencial aquífero que favorece sobremaneira a fauna e a flora (AIBA, 2020; MMA, 2015).

6.2 Contextualização

6.2.1 Os Solos no Cerrado

Nas áreas sob vegetação do Bioma Cerrado encontram-se diversos tipos de solos (Tabela 1), desde a classe dos Neossolos que são caracterizados como solos jovens até a dos Latossolos que são os representantes dos solos velhos altamente intemperizados (Goedert, 1985; Embrapa - SiBCS, 2018).

Tabela 1 - As principais classes, antigas e atuais, dos solos nos cerrados do Brasil

CLASSE DO SOLO		Superfície da região - Classificação antiga	
Antiga (Goedert, 1985)	Atual (SiBCS, 2018)	km ²	%
Latossolos	Latossolos	935.870	46,0
Concrecionarios/Lateríticos	Plintossolos	57.460	2,8
Podzólicos	Argissolos	307.677	15,1
Terra Rocha	Nitossolos	34.231	1,7
Cambissolos	Cambissolos	61.943	3,0
Litossolos	Neossolos	148.134	7,3
Areia Quartzosas	Neossolos	309.715	15,2
Lateritas Hidromórficas	Plintossolos	122.664	6,0
Glei	Gleissolos	4.752	2,0
Outros	-----	91.154	0,9

Fonte: Goedert (1985) e Embrapa – SiBCS (2018).

Os Latossolos são os mais representativos desse Bioma, com cerca 46%, distribuídos entre as áreas de relevo plano a suave ondulação e nos imensos chapadões. Sendo eles de maior extensão geográfica e com características próprias, ocupam quase 50% da região (Tabela 1), se tornando o solo mais utilizado em todo o cerrado para fins agrícolas.

O Cerrado da região do Oeste baiano, com aproximadamente 115.108 km², faz limite com os estados de Goiás, Tocantins e Piauí, está situado no extremo oeste baiano, compreendendo principalmente os municípios de Angical, Baianópolis, Barreiras, Cocos, Correntina, Cristópolis, Formosa do Rio Preto, Jaborandi, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves, Santa Rita de Cássia e São Desidério (Silva Jr, 2019). A despeito do Brasil, nessa região também predominam os Latossolos onde além do estabelecimento do cultivo de grãos e fibras, na atualidade, também foram introduzidas outras culturas, tais como a cultura do café e silvicultura, dentre outras, que possibilitam o destaque do agronegócio na região (AIBA, 2019).

6.2.2 Os Latossolos

Cobrindo uma área total de cerca de 39% do Brasil, os Latossolos se distribuem nas regiões equatoriais e tropicais, úmidas, com elevadas temperaturas e precipitação, alto grau de intemperismo, muito evoluídos pedogeneticamente como resultado de enérgicas transformações do material constitutivo, pois a natureza e a paisagem local permitiram tal evolução, justamente onde ocorrem intensas atividades erosivas. Portanto, são solos altamente desenvolvidos e intemperizados, sem incremento de argila em profundidade, guardam registros da sua evolução onde através de seus atributos é possível inferir sobre seu atual estágio evolutivo. Esses solos dominam nas paisagens do Centro-Oeste baiano, ocupando áreas geralmente plana-onduladas, sob vegetação de cerrado, de textura variando de francoarenosa a muito argilosa, fertilidade baixa a média e elevado potencial agrícola (Goedert, 1985; Embrapa-SiBCS, 2018).

Os Latossolos possuem perfis homogêneos, porosos, fortemente a bem drenados, profundos a muito profundos (≥ 2 m), sua parte sólida é constituída por uma fração mineral e outra fração orgânica. A fração mineral apresenta predomínio dos argilominerais do tipo 1:1 (grupo da caulinita) e de oxihidróxidos hidratados de ferro e alumínio e também da fração orgânica. Em sua composição os Latossolos, são praticamente destituídos de minerais primários facilmente intemperizados. Possuem, baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e de saturação por bases (V), teor elevado do alumínio trocável, fortemente ácidos (pH entre 4,3 – 5,3) e baixa fertilidade natural (Embrapa-SiBCS, 2018), em geral, com deficiência em quase todos os nutrientes essenciais as plantas.

6.2.3 Fertilidade do Solo

Segundo a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, o termo fertilidade do solo é o “Status de um solo com respeito à sua capacidade de suprir os nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas” (Curi *et al.*, 1993). Naturalmente, os solos podem apresentar-se com boa fertilidade, a exemplo da classe dos Chernossolos, que são solos mais jovens, ou serem de baixa fertilidade como os Latossolos que já sofreram intemperização por longo período com lixiviação dos cátions de caráter básicos.

A capacidade do solo em suprir os nutrientes que possuem em forma disponível as plantas é função de sua capacidade de troca catiônica (CTC), atributo específico para cada grupo de

solo, que segundo Silva Jr (2019) essa característica é função da mineralogia e da relação que possui com a MOS, podendo permitir que haja aumento na disponibilidade de nutrientes no complexo de troca do solo. No entanto, com as atividades antrópicas, usando práticas de manejo adequadas ou impróprias, podem melhorar ou reduzir as características de produtividade das áreas em exploração agrícola.

Com isso, temos que um solo fértil quando esse possui capacidade de fornecer água e nutrientes às plantas nas proporções adequadas para seus crescimentos e desenvolvimentos e promover elevados índices de produtividades de uma lavoura. Portanto, o conhecimento da fertilidade do solo é essencial, visto que além dos atributos nutricionais da fertilidade em si, também deve ser considerado os aspectos biológicos e físicos do solo na promoção do desenvolvimento das plantas, devido à importância da interação desses fatores no processo nutricional e produtivo (Novais *et al.*, 2007).

Esse tema teve destaque no Brasil a partir da década de 60, com os programas de recomendação da adubação e de calagem com base na análise do solo. Devido a Revolução verde com a expansão da área cultivada, especialmente com espécies graníferas em solos ácidos e de baixa fertilidade em condições naturais ou proporcionada pela mecanização agrícola e pelo uso de insumos modernos na agricultura (Curi *et al.*, 1993; Novais *et al.*, 2007).

O entendimento da química do solo resulta da interpretação dos resultados das análises da reação (pH), do alumínio trocável, e demais elementos que tem participação direta no fornecimento de minerais de importância agrícola e da matéria orgânica presentes na camada arável do solo. A fertilidade natural do solo pode ser efetiva ou potencial, pois estão relacionadas à formação do solo, com a liberação direta dos nutrientes as plantas ou condicionada às limitações em fornecer os nutrientes em quantidades adequadas as plantas, condições essas típicas dos solos ácidos. Também, é importante se referir à fertilidade antrópica causada pela intervenção humana nas atividades operacionais agrícolas.

Uma das principais características dos Latossolos é serem naturalmente ácidos ($\text{pH} < 7,0$) causa dos elevados teores de alumínio tóxico (Al^{3+}) e de baixa fertilidade. Isso decorre do material de origem, a rocha matriz, submetido aos fatores e processos de formação do solo e, da intensidade da ação dos agentes do intemperismo. Durante o processo de formação na parte sólida desses solos há predominância da adsorção dos cátions de natureza ácida, como Al^{3+} e H^+ por efeito de ligação eletrostática e/ou ligação covalente. Em consequência, há a remoção, para a solução do solo, dos cátions de caráter básicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ de onde são lixiviados para as camadas mais profundas do solo ou mesmos para o lençol freático e, assim concorre para a baixa fertilidade dessas áreas. A adsorção do Al^{3+} a parte sólida desses solos, em forma trocável, é o que caracteriza a acidez potencial dessas áreas e mantém os Latossolos com características de elevada acidez ativa (Melo; Alleoni, 2009).

A parte sólida do solo é o reservatório dos nutrientes da planta e, portanto, de sua fertilidade. Isso tem um entendimento holístico que se relaciona com o socioeconômico, tipo de exploração agrícola e com o referencial tecnológico do produtor rural. A grande maioria dos agricultores brasileiros não distingue o tipo de exploração agrícola que a prática. Cada exploração agrícola exige uma visão diferenciada a respeito da fertilidade do solo, por exemplo: a) Agricultura tradicional – praticada pelo pequeno produtor rural com baixos níveis tecnológicos, o termo fertilidade do solo fica renegado apenas a produção obtida em sua propriedade. Em que pese sua baixa produtividade, esse tipo de exploração agrícola responde

por cerca de 80% da produção de grãos no país. b) Agricultura convencional – que contempla uma grande variedade de exploração agrícola desde a agricultura extensiva, passando pela agricultura de precisão até mesmo o plantio direto na palhada. Esse tipo de exploração tem uma visão bastante diferenciada de fertilidade do solo, desde a fertilidade natural usada geralmente na agricultura extensiva à fertilidade antrópica, na agricultura de precisão ou de mercado, quando se faz necessárias aplicações adicionais de fertilizantes para atender os níveis de produtividades preconizados. c) Agricultura ecológica – é uma agricultura de base ecológica, cujo sistema se baseia na utilização de processos e recursos naturais, uma vez que não recomenda a utilização de produtos químicos como fertilizantes ou pesticidas nem organismos geneticamente modificados (OGM). Porém, para esse tipo de exploração agrícola a fertilidade resulta do processo de formação do solo acrescida da mineralização de produtos orgânicos incorporados ao solo durante os processos de produção (Lepsch, 2010).

6.2.4 Matéria Orgânica do Solo

A matéria orgânica do solo (MOS) tem como fonte primária o gás carbônico (CO₂) atmosférico, sequestrado principalmente pelo processo da fotossíntese das plantas superiores. Nos solos agrícolas a MOS é dividida em duas frações a matéria orgânica viva que raramente ultrapassa 4% do carbono orgânico total e que é constituída pelos microrganismos do solo responsáveis pelos processos da imobilização e a mineralização dos nutrientes da MOS. E o restante constitui a matéria orgânica morta resultante de restos animais e vegetais em vários estágios de decomposição que para muitos pesquisadores é entendido como a real MOS.

O estágio final de decomposição da MOS é denominado de húmus que são partículas coloidais (< 2µm) de alta reatividade. As substâncias húmicas são divididas em: húmina, ácidos húmicos e ácidos flúvicos constituídos, sobretudo, por polissacarídeos, aminoácidos e compostos fenólicos, que são mais reativos do que as outras duas frações pela maior quantidade de grupos carboxílicos e fenólicos que contém e, assim contribuem imediatamente para a CTC do solo. A fração orgânica corresponde à matéria orgânica do solo (MOS), que além de outros nutrientes das plantas é constituída principalmente por C, H, O, N, S e P. Onde, o C compreende cerca de (58%) da MOS, O (33%), H (6%), enquanto N, S e P contribuem com cerca de 3%, individualmente (Leite *et al.*, 2003; Novais *et al.*, 2007).

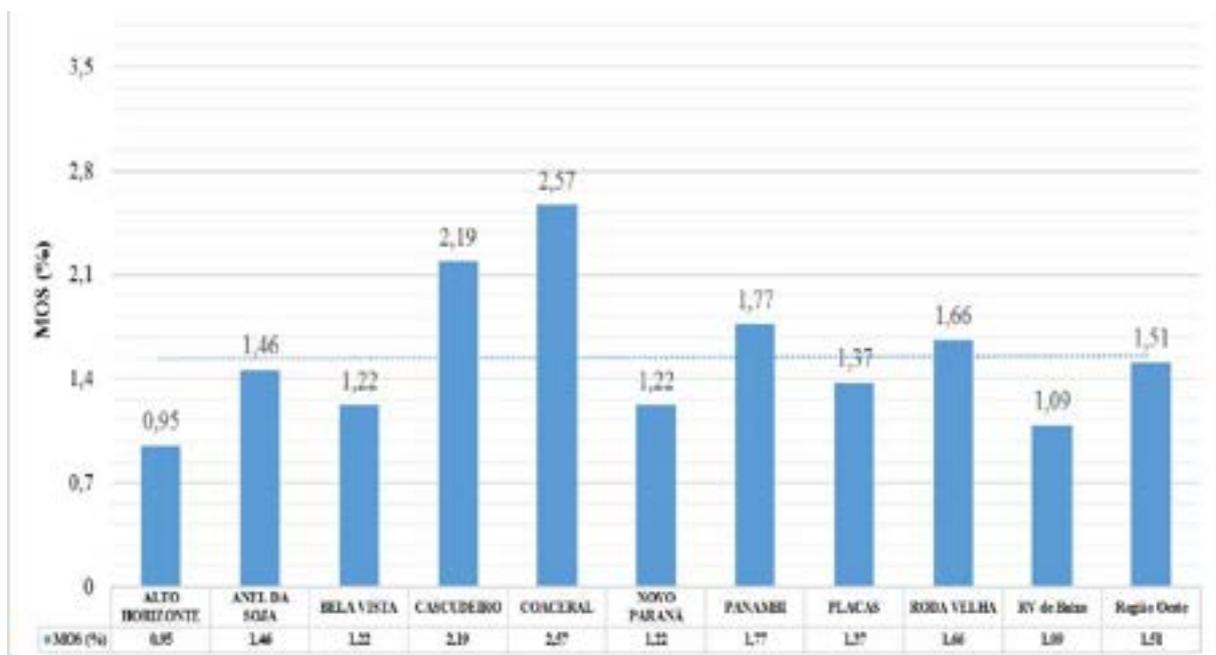
Para os solos de cerrados, notadamente os Latossolos, a MOS deve ser entendida como o principal fator capaz de melhorar as características de fertilidade dessas áreas. Haja vista, que as frações mineral e orgânica do solo são os únicos determinantes da capacidade de troca catiônica do complexo sortivo e, em condições singulares da fertilidade do solo. As características da fração mineral dos Latossolos são naturalmente de baixa CTC e, isso praticamente não muda com as práticas aplicadas a agricultura. Porém, em condições naturais geralmente a MOS dos Latossolos é baixa ($\leq 1\%$) o que contribui para que essas áreas se mantenham com baixa CTC, e portando nível baixo de fertilidade. Mas o uso e manejo prolongado de práticas agrícolas apropriadas podem aumentar substancialmente o teor de a matéria nessas áreas e torná-las com fertilidade média a alta e com significativa redução na aplicação de fertilizantes minerais e assim tornando-se como uma importante ferramenta para economia do produtor rural.

As boas práticas agrícolas, na direção da busca pela sustentabilidade do agronegócio e ambiental, é o compromisso com a produção de alimentos de qualidade, sem agredir o meio

ambiente, para atender a demanda crescente das populações presentes e futuras (Silva Jr, 2016). Estudos recentes, revelam que as áreas nativas do Cerrado apresentam baixos teores naturais de MOS, com isso, deve-se buscar incentivar cada vez mais os produtores em utilizar manejos que busquem o aumento desse atributo como saída para melhoria das características de ordem físicas, químicas e biológicas do solo (Silva Jr, 2019; Sá *et al*; 2001). Freitas e Silva Jr (2022) estudando as frações húmicas dos solos de uma área sob cultivo de banana observaram que essas apresentavam maior qualidade de matéria orgânica, bem como de suas frações, melhorando o solo quando comparados com as áreas de solo sem antropização.

De maneira geral, Silva Jr (2019) aponta que os solos do Cerrado da região oeste da Bahia, sob exploração agrícola, apresentam como média 1,51% de MOS (Figura 1), que é considerada baixa de acordo com a classificação de Ribeiro *et al.* (1999), o que evidencia que as práticas conservacionistas precisam ser cada vez mais respeitadas, para garantir a sustentabilidade da produção nessas áreas.

Figura 1 - Apresentação dos Teores de MOS (%) encontrados nos solos das microrregiões cultivadas com grãos e fibras no oeste da Bahia



Fonte: Silva Jr. (2019).

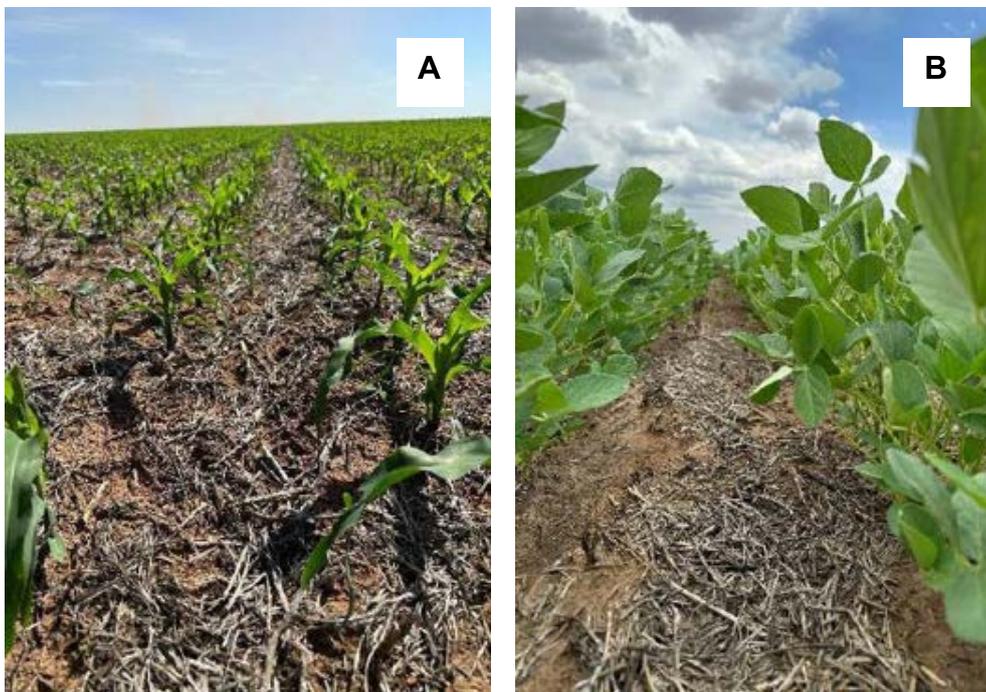
O incremento na fixação de carbono no solo, possibilita um equilíbrio na humificação da MOS e as práticas culturais aplicadas, trazendo uma estabilidade na qualidade do solo. Portanto, recomenda-se o uso de espécies de cobertura vegetal e/ou adubos orgânicos como formas de possibilitar a melhoria desse aumento de MOS no solo, buscando uma relação C/N adequada de modo a permitir que a palhada permaneça na superfície um tempo adequado para a proteção deste enquanto ocorre a mineralização (Silva Jr, 2019).

Apresentando grande destaque nacional em qualidade da produção de fibras de algodão, assim como produtividade elevada de soja, essa região iniciou o cultivo de grãos por

meio dos imigrantes sulistas, vindos da região sul nos anos 1970. Atualmente são cultivados cerca de 2,545 milhões de hectares na região oeste baiana, sendo que aproximadamente 2 milhões de hectares são de uso exclusivo com a cultura da soja (*Glycine max* Merrill [L]), considerada o carro chefe da região. O restante fica para as culturas do milho (*Zea mays*), algodão (*Gossypium hirsutum*), café (*Coffea arabica*), sorgo (*Sorgum bicolor*), arroz (*Oriza sativa*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), e demais culturas (AIBA, 2022; AIBA, 2023).

Com essa grande participação produtiva nessas áreas de uso agrícola, a busca por manejos de boas práticas agrícolas é cada vez mais presente, que são incentivadas por entidades de estudo e pesquisa, e organizações locais. Dentre as práticas conservacionistas do solo mais comuns, temos o manejo adequado de uso dos agrotóxicos, dos corretivos e dos fertilizantes de solo, e o uso de terraceamentos e de barraginhas para absorção das águas pluviais (Silva Jr, 2019), assim como a realização dos plantios em sistemas de plantio direto na palha (SPD), Figura 2.

Figura 2 - Cultivo em Sistema de Plantio Direto: A- na cultura do Milho em lavouras da Microrregião do Alto Jaborandi, e B – na cultura da Soja em lavouras da Microrregião da Roda Velha, município de Jaborandi e São Desidério, respectivamente, no oeste do estado da Bahia



Fonte: Os Autores (2024).

Esse sistema nem sempre é seguido à risca pelos produtores devido à grande dificuldade enfrentada de manter palhada nas condições de Cerrado, sendo então optado a continuidade do sistema de plantio convencional (SPC) onde faz-se o revolvimento do solo. Em alguns casos tem-se repetido muito um sistema de cultivo misto (nem SPC e nem SPD) ou também chamado de sistema de plantio direto não consolidado (SPD_{NC}). Para Silva Jr (2019) o SPD, contribuindo cada vez mais com o incremento da fixação de carbono, por meio do aumento da MOS, que tem papel significativo na qualidade do solo e melhoria no aproveitamento dos nutrientes.

Como os solos predominantes são Latossolos, de textura arenosa, estes solos apresentam argila predominante do tipo caulinita, que são muito frágeis e requerem a MOS para viabilizar a agregação necessária para boa estrutura do solo, contribuindo com a formação dos agregados do solo, com presença de macro e microporos. Sendo assim, a importância de trabalhar manejos que permitam essa estrutura adequada do solo precisam ser destacados, e têm as forrageiras como alternativas viáveis (Silva Jr, 2019).

Na região de Cerrado, a sustentabilidade do sistema plantio direto era dificultada pela baixa formação de palhada em virtude dos longos períodos secos. No entanto, com o passar do tempo, verificou-se, nas mais variadas condições e regiões do País, que a erosão poderia ser reduzida drasticamente, sendo também possível o controle adequado das invasoras sem a necessidade de uso de herbicidas. Hoje a adoção do plantio direto na palhada nos Cerrados é uma realidade, em razão dos inúmeros benefícios que fornecem para uma agricultura sustentável visto integrar as práticas de caráter edáfico, mecânico e até mesmo vegetativo ao mesmo tempo.

Nas chamadas fronteiras agrícolas, que vêm a serem as áreas recentemente desflorestadas, continuam a se repetir os erros e descuidos de antigamente. Neste sentido é importante atuar junto aos produtores na busca das soluções técnicas e economicamente viáveis para evitar ou mitigar a perda de áreas produtivas por manejo inadequado e consequente erosão, contaminação dos recursos hídricos e assoreamento dos reservatórios (Silva Jr *et al.*, 2016). É oportuno, lembrar também, que os solos são considerados recursos naturais não renováveis, sendo de grande importância a sua conservação e adequada utilização.

Segundo Brock *et al.* (2022), o tempo de uso do solo com práticas agrícolas de correção da acidez e dos nutrientes permitem alterações no solo de ordem físico-químicas favorecem o desempenho das lavouras. O que permite estabilidade nos pontos de fósforo (P) nas áreas de seu estudo de 1, 11 e 22 anos de cultivo de soja na região do Cascudeiro, município de Baianópolis – BA. Silva Jr (2019) aponta essa microrregião como uma das que mais apresentaram acúmulo de MOS na região oeste da Bahia, e destaca que o histórico do uso dos solos cultivados, manejo de pecuária com uso de forrageiras, em sua maioria pastagens, que permitem uma maior qualidade de MOS.

A melhoria gradativa da qualidade do solo, é possível por meio do uso da rotação das culturas. Silva *et al.* (2022) destaca que uma rotação associada a manejo de SPD bem executado podem gerar benefícios ao produtor. Contribuindo no controle da erosão, aumentando o estabelecimento de agregados, incrementando a biologia e promovendo os efeitos benéficos na fertilidade do solo por meio da ciclagem dos nutrientes.

Na globalização versus sustentabilidade agrícola, questiona-se até que ponto o “sistema Terra” suportará o crescimento demográfico e ainda se há como garantir qualidade de vida decente e satisfatória a uma população crescente. Nessa direção há um entendimento de que qualquer modelo de desenvolvimento sustentável assevera-se pautar em padrões éticos que objetivem um melhor equilíbrio nos padrões de consumo entre ricos e menos favorecidos, de forma a garantir um bem-estar a toda à população, sem ultrapassar a capacidade do meio ambiente de se regenerar (Teixeira *et al.*, 2009; FAPESP, 1998).

6.3 Impactos e Importância do Desenvolvimento Sustentável

Diante dos esforços da Organização das Nações Unidas (ONU) frente à questão ambiental, o entendimento do desenvolvimento sustentável só começou ganhar destaque nos meios de comunicação por volta de 1960. Porém, só na década de 80 foi introduzido o conceito de desenvolvimento sustentável pela ONU, cujo entendimento se consolidou na Rio-92/Eco-92, a primeira conferência da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, quando foram lançadas as bases para um desenvolvimento sustentável no planeta Terra (AIBA, 2020).

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2023), em todo o mundo, a degradação da terra afeta quase 2 bilhões de hectares, onde vivem 1,5 bilhão de pessoas. Todos os anos, 12 milhões de hectares de terra são degradados a cada ano, o que representa cerca de 23 hectares por minuto. Ameaças como erosão, compactação e perda da matéria orgânica, entre outros, atingem quase um terço das terras do planeta. Perdas anuais de culturas causadas por erosão foram estimadas em 0,3% da produção. Se o problema continuar nesse ritmo, uma redução total de mais de 10% poderá acontecer até 2050. A erosão em solo agrícola e de pastagem intensiva varia entre cem a mil vezes a taxa de erosão natural e o custo anual de fertilizantes para substituir os nutrientes perdidos pela erosão chega a US \$ 150 bilhões.

Segundo estudos recentes, a nível global, áreas já degradadas perfazem cerca de 300 milhões de hectares na África, 440 milhões de hectares na Ásia e 140 milhões de hectares na América Latina. Além disso, cerca de cinco a sete milhões de hectares de solos são perdidos anualmente para os oceanos. Por exemplo, 40% da área originalmente apta à agricultura na Índia encontram-se parcialmente ou totalmente degradada. Na bacia do Paraná (principalmente PR e SP), diversas e extensas áreas apresentam-se improdutivas, ocupadas por grandes feições erosivas denominadas voçorocas, formadas pela erosão intensa, ocasionada pelo desmatamento, uso inadequado do solo e descuido no gerenciamento das águas superficiais. A perda de solo, em terras agrícolas, causada pela erosão, em todo planeta é estimada em cerca de 75 bilhões de toneladas de solos todos os anos (Novais *et al.*, 2007; Teixeira *et al.*, 2009).

Quando os solos são utilizados exaustivamente na agricultura, ocorrem muitas perdas, por diversos fatores, em geral devido ao uso e manejo inadequados. O estado de São Paulo perde cerca de 38,1; 24,8; 20,1 e 120 t/ha/ano de solo em cultivos com as culturas do feijão, algodão, soja e milho, respectivamente, o que é preocupante se levarmos em conta que esses desperdícios não retornarão mais para as áreas de produção (Teixeira *et al.*, 2009).

O aumento de áreas degradadas em regiões anteriormente produtivas tem sido constatado em diferentes regiões do Brasil, causa do uso inadequado das práticas agrícolas. Fato atribuído, principal a erosão hídrica em suas mais variadas formas, que tem levado solo, sementes, adubos e agrotóxicos para lagos, rios até atingir o mar. Nos solos das áreas nos perímetros irrigados do Nordeste o problema diz respeito a salinidade/sodicidade. O resultado é a perda da produção o empobrecimento dos produtores; o assoreamento e a contaminação dos corpos hídricos e o desmatamento para abertura de novas áreas de produção causando perdas da biodiversidade em diferentes biomas brasileiros.

6.4 Manejo e Conservação do Solo e da Água

As práticas agrícolas de qualidade são procedimentos normativos e recomendações técnicas aplicadas nas etapas da produção, processamento e transporte de produtos vegetais alimentícios, orientados a promover a oferta de alimentos seguros. Com isso, a população em geral e em especial, a busca da melhoria da qualidade de vida, renda e saúde do trabalhador e produtor rural, ao tempo em que protege o meio ambiente (FAO, 2023).

O primeiro princípio para programar boas práticas agrícolas prescinde de um planejamento que contemple a prevenção e controle efetivo da erosão e conservação do solo e da água, em qualquer unidade agrícola com características edafoclimáticas peculiares. O segundo princípio busca realizar a aplicação eficiente das medidas conservacionistas que exige, impreterivelmente, a presença do técnico no campo. Esse entendimento deve estar contemplado nos diversos sistemas de exploração de produtos agrícolas, sejam nas pequenas e ou grandes propriedades rurais, independentes dos níveis de tecnológicos utilizados.

A agricultura brasileira experimentou grande desenvolvimento durante os últimos 100 anos, obtendo aumentos significativos na produtividade de uma gama de culturas, com destaque para as últimas três décadas. Isso se deve as inovações tecnológicas resultante de inúmeras pesquisas e da difusão do uso dessas técnicas. Porém, neste contexto, nem sempre a sustentabilidade da produção agrícola como visão de futuro tem sido o objetivo principal.

O solo e a água são elementos fundamentais de sustentação dos sistemas agrícolas e naturais. Reverter o quadro de degradação de extensas áreas agrícolas; aperfeiçoar o uso do solo e da água com potencial para aumentar a produção agrícola; contribuir para a mitigação de impactos ambientais e desenvolver novos insumos e sistemas de produção, capazes de promover a sustentabilidade ambiental, social e econômica pelas gerações presentes e futuras.

Esses são alguns dos desafios para o manejo e a conservação do solo e da água para os diversos ambientes, usos e estados de degradação das terras (Andrade *et al.*, 2010). Os esforços voltados à conservação do solo e da água, especialmente no Brasil, concentrados apenas nas práticas mecânicas, focados no controle da erosão tem se mostrados insuficientes para algumas regiões.

O uso da agricultura sustentável, em seu *stricto sensu*, permite afirmar ser possível cultivar o solo sem depauperá-lo significativamente, e acabar com um aparente conflito ecológico entre a agricultura do homem e o equilíbrio do meio ambiente. Na região, chamada de fronteiras agrícolas do Oeste baiano têm registrado elevados níveis de produtividades, em diversos sistemas de exploração agrícola de uma série de culturas produtoras de grãos, fibras, frutas entre outras. Nessas áreas onde predominam os Latossolos, em sua grande maioria, são caracterizadas como de ecossistemas frágeis, portanto exigem cuidados especiais relacionados ao uso e manejo do solo e da água. Para que esses índices de produtividades, nessas áreas, se mantenham duradouros ao longo dos tempos devem estar respaldados num planejamento agrícola sustentável. É imperativo a expectativa que os lucros financeiros auferidos pela produção agrícola no presente possa ser a porta de prejuízos no futuro e contribuir para a miséria e a fome das populações.

Nesse entendimento deve estar incluída a visão da adoção de boas práticas agrícolas, temas indissociáveis da interação entre as práticas conservacionistas do solo e da água que são de caráter edáfico, mecânico e vegetativo: a) **Práticas de caráter edáfico** - são medidas que

visam manter ou melhorar a fertilidade do solo, com à adequada disponibilidade de nutrientes para as plantas, como forma de assegurar o rendimento das culturas. b) **Práticas de caráter mecânico** - são medidas que visam a regulamentação de relevo do terreno, no sentido de mitigar a perda de solo e água pelo processo erosivo. c) **Práticas de caráter vegetativo** – são métodos de cultivos que se inter-relacionam e se complementam com as práticas edáficas e mecânicas e visam também o controle de pragas e doenças na área. d) **Sistema de plantio direto na palhada** – **em que pese** estar inserido no contexto do sistema de plantio convencional é visto pelos pesquisadores e produtores da atualidade como uma prática conservacionista de grande relevância para as áreas de cerrado. Haja vista, os inúmeros benefícios que proporciona ao uso e manejo do solo e da água além de contribuir, sobretudo para o sequestro do gás carbono (CO₂) atmosférico.

6.5 Considerações finais

Diante do exposto, é fato que a agricultura que vem se desenvolvendo em grande velocidade e as tecnologias precisam atender as demandas que surgem. Dentre elas as demandas de conservação e sustentabilidade dos solos no bioma Cerrado é uma das que mais tem sido destaque. Permitindo que ocorram as altas produtividades, e abertura de novas áreas produtivas na região. E mesmo com a maioria dos solos sob produção em Latossolos, as técnicas de uso de insumos inteligentes, e de baixo impacto são cada vez mais presentes, além do uso de manejo de proteção desses solos permitindo a estabilidade microbiológica e sua diversidade, como também a qualidade física dos solos. O Sistema de Plantio Direto e Cultivo Misto já é uma realidade, sendo agora a prioridade a busca de variedades de plantas que permitam a fixação de Matéria Orgânica em profundidade, e permitindo a manutenção da umidade pela porosidade do solo. Muito se evoluiu e avançou, mas os desafios persistem e a união da academia por meio de pesquisadores, juntamente com os produtores e o corpo técnico de consultores conduzem a novas realidades de produção na região, tendo como suporte o uso de tecnologias digitais, de insumos e manejo específico para cada microrregião do oeste baiano.

Referências

- AIBA RURAL. **A força que vem da terra**. 12. ed. Barreiras. Ano V. 1.º trimestre, 2019. Disponível em: <https://aiba.org.br/wp-content/uploads/2022/07/Revista-AIBA-Rural-Edicao-12.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- AIBA RURAL. **Kits de irrigação incrementam produção de alimentos no oeste da Bahia**. 30 junho de 2020. Disponível em: <https://abapa.com.br/mais-noticias/informe-aibaabapa-junho-2020/>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- AIBA RURAL. **Sustentabilidade**. Barreiras. Ano VI, 3º trimestre, 2020.
- AIBA – Associação dos Agricultores e Irrigantes da Bahia. **Anuário da Região Oeste da Bahia – Safra 2021/2022**. Santa Cruz do Sul, RS: Ed. Gazeta Santa Cruz, 2022.
- AIBA – Associação dos Agricultores e Irrigantes da Bahia. **Anuário da Região Oeste da Bahia – Safra 2021/2022**. Santa Cruz do Sul, Ed. Gazeta Santa Cruz, 2022.

AIBA – Associação dos Agricultores e Irrigantes da Bahia. **BOLETIM AIBA: Panorama para a estimativa da Produção de Grãos no Oeste da Bahia.** Circular 12 SAFRA 23/24. 2023.

ADAB – Agência Estadual de Defesa Agropecuária da Bahia. **Portaria Nº 161 de 18 de setembro de 2014.** ...a data limite para a semeadura de soja irrigada, safra 2014/2015.

ANDRADE, A. G.; FREITA, P. L.; LANDERS, J. **Aspectos gerais do manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais.** Rio de Janeiro. Embrapa/Solos. 27 - 42p. 2010.

AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. de. Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramenta para agricultura sustentável. Brasília-DF. **Embrapa Agrobiologia** (Embrapa Informações Tecnológicas). 2005. 368p.

BARBOSA, A. S. **O Cerrado está extinto e isso leva ao fim dos rios e reservatórios de água.** 2014. Sul 21. Disponível em: <https://sul21.com.br>. notícias geral. Acesso em: 20 jun. 2021.

BARRETO JÚNIOR, G. S; OLIVEIRA, F. A.; SILVA JÚNIOR. LOPES, J. C. M. Importância da adubação fosfatada no oeste baiano. Barreiras-BA. **Aiba Rural**, 2º Semestre. 2020, p.14-15.

BRASIL. **Levantamento exploratório:** reconhecimento de solos de Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: MA/SUDENE/DRN, (Boletim Técnico, 15). 683p, 1972.

BROCK, A. G; SILVA JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, F. A. **Varição de NPK em solos agrícolas com diferentes períodos de uso, no bioma cerrado.** CONTECC 2022, 77ª SOEA, Goiânia – GO.

CURI, N.; LARACH, J. O. I; KAMPF, N. *et al.* **Vocabulário de Ciência do Solo.** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 90p., 1993.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Definição e Notação de Horizontes e Camadas do Solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa-SNLCS, 54p. 1988. (Documentos SNLCS,.3)

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistemas Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412 p., 1999.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro - RJ. **Sistemas Brasileiro de Classificação de Solos** 3. ed. Brasília. Embrapa, DF. Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353 p., 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro - RJ. **Sistemas Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília. Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 356 p., 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos do Brasil.** Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acesso em: 15 nov. 2023.

EMBRAPA/SUDENE. **Levantamento Exploratório** – Reconhecimento de solos da margem esquerda do Rio São Francisco Estado da Bahia. Recife. Boletim Técnico no 38. (Serviço Nacional de Levantamento de Solos/EMBRAPA/SUDENE). 1976. p. 405.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/es/c/1476372/>. Acesso em: 24 nov. 2023.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Índios do Brasil, 1998**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/indios-do-brasil>. Acesso em: 25 nov. 2023.

FREITAS, J. V.; SILVA JÚNIOR, J. **Qualidade da Matéria Orgânica dos solos agrícolas sob diferentes usos no perímetro irrigado Barreiras Norte, no Oeste da Bahia**. CONTECC 2022, 77^a SOEA, Goiânia – GO.

GOEDERT, W.J. **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Brasília: Nobel, EMBRAPA/CPAC, 1985. 422p.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações Solo - Planta**. São Paulo. Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba-SP: Editora Agronômica “Seres”, 1985. p. 492.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do cerrado brasileiro. **Megadiversidades**. V.1, n.1, 2005. Disponível em: <http://www.agencia.inptia.embrapa/recursos/>. Acesso em: 25 ago. 2023.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. *et al.* Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. Viçosa - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 821-832p, 2003.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. SBCS/SNLCS. Campinas, 1982. 46 p.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 178 p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 216, p. 2010,

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo**, Parte II – Aplicações. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 685.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **O Bioma Cerrado**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>. Acesso em: 20 set. 2015.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007, 1017p.

PAMPLONA, C.; STAHLKE, L.; FÉLIX, C. Cerrado 40 anos. *In: AIBA RURAL*. Barreiras – BA: AIBA, 2015, p. 2-23.

PAN-Brasil. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br>. Acesso em: 20 nov. 2023.

PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. **Manejo e Conservação do Solos e da Água no Contexto das Mudanças Ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010, p. 490.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potássica e do Fósforo, 1991, p.343.

RIBEIRO, A. C.; GONTIJO, G. P. T.; HUGO, A.V.V. **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais – Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes**, 5ª aproximação. Viçosa, MG: Editora UFV, 359 p. 1999.

SÁ, J. C. M. de; CERRI, C. C.; DICK, W. A. *et al.* Organic mater dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v. 65, n.5, p. 1486-1499, 2001.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551486x>.

SILVA JR, J. da. Potencial de sequestro de carbono em solos do cerrado. *In*: SILVA, J. C.; ASSIS, R. T.; FRAVET, P. R. (Org.). **Bases Sustentáveis do Agronegócio**. Uberlândia, MG: Ed. COMPOSER, 2016.

SILVA JR, J.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, R. R.; LOPES, J. C. **Diagnóstico da agricultura potencialmente sequestradora de carbono no cerrado do oeste da Bahia**. Relatório Técnico. AIBA, Barreiras, Bahia. 2014.

SILVA JR, J. Matéria orgânica do solo em sistemas de produção agrícola e no cerrado do Oeste baiano [recurso eletrônico] / Jorge da Silva Júnior. - 2019. **Tese (Doutorado)** PPGA/UFU. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.1235>. 80p.

SILVA, M.A.; NASCIMENTO, A.S.; LANNA, A.C. *et al.* **Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado**, 2022. Acesso: 02 de junho de 2024. Research, Society and Development, 2022, rsdjournal.org.

TEIXEIRA, W. FAIRCHILD, T.; TOLEO, M.C.M; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2 ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 623 p., 2009.

CAPÍTULO 7

SOLOS DO BIOMA CERRADO: MANEJO, CONSERVAÇÃO E POTENCIAL PARA O MERCADO DE CARBONO

Camila Almeida dos Santos
Eduardo Carvalho da Silva Neto

Resumo

O Cerrado destaca-se não apenas por sua rica diversidade vegetal, mas também pelos solos que sustentam essa biodiversidade. As características desses solos refletem uma interação complexa entre fatores físicos, químicos e mineralógicos, moldando a paisagem única da região. O conhecimento sobre os solos do Cerrado é crucial para análises agrícolas, avaliações ambientais e o impacto da degradação no desenvolvimento humano e na conservação dos ecossistemas locais. Essas informações podem orientar políticas de proteção desse recurso não renovável, considerando aspectos sociais e econômicos. Práticas conservacionistas, como o SPD e ILPF, juntamente com a recuperação de pastagens, aumentam a eficiência do sistema agropecuário, reduzem as emissões de gases e desempenham um papel crucial na captura e armazenamento de carbono no solo. Além de aumentar a produtividade, essas práticas podem gerar renda por meio do mercado voluntário de carbono e do *Nature-Based Market*, contribuindo para a preservação ambiental e o equilíbrio entre produção alimentar e gestão responsável dos recursos naturais.

7.1 Introdução

O Cerrado, segundo maior bioma do Brasil e da América do Sul, ocupa aproximadamente 22% do território nacional, abrangendo uma extensão de 180 milhões de hectares ou 1.800.000 km² abrangendo os estados de Goiás, Tocantins e o Distrito Federal em sua totalidade, parte dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo, além de muitas áreas disjuntas e isoladas em todo o Brasil. Representa uma região muito extensa, na qual um grande compartimento na parte interna é essencialmente Cerrado (savana) e as bordas periféricas ao norte, nordeste e sul são zonas ecotonais (de transição) com outra vegetação (Floresta, Caatinga) (IBGE, 2004).

Figura 1 - Limites do bioma Cerrado



Fonte: Oliveira *et al.* (2023).

Destaca-se, como componente central para a manutenção desse bioma, o solo. Os solos do Cerrado brasileiro são, em geral, muito antigos, originando-se de coberturas sedimentares e, devido ao intemperismo acentuado, possuem reduzida reserva de nutrientes. Embora apresentem baixa fertilidade natural em aspectos físicos e topográficos, esse bioma é favorecido por relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, perfis com boa drenagem e características físicas propícias à mecanização. Assim, para viabilizar a agricultura intensiva, foi preciso melhorar a fertilidade química do solo. Para alcançar esse objetivo, são essenciais informações detalhadas sobre a distribuição das classes de solos no Cerrado, incluindo suas principais características químicas, físicas, morfológicas e mineralógicas.

Práticas de agricultura inteligente em termos climáticos, principalmente plantio direto, plantas de cobertura, fertilização do solo com corretivos orgânicos e sistemas integrados, como lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta, têm sido amplamente adotadas em áreas do Cerrado brasileiro. De maneira geral, tais práticas, resultam em um acréscimo de carbono no solo após sua adoção, indicando que a diversificação e intensificação das áreas agrícolas no Cerrado é um caminho promissor para aumentar os estoques de carbono no solo e, conseqüentemente, contribuir para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (Oliveira *et al.*, 2023). Além disso, estudos recentes mostram que o Cerrado tem cinco vezes mais carbono nos estoques subterrâneos (raízes+solo). Assim, fica clara a relevância do Cerrado no ciclo global armazenamento de carbono, especialmente no solo, e a necessidade de melhor gerir e proteger esse bioma (Terra *et al.*, 2023).

Os primeiros estudos de solos no bioma Cerrado datam da década de 1960. Devido à escala cartográfica e ao método de generalização empregados, as unidades de mapeamento consistem em associações de solos, indicando apenas as classes de solos mais expressivas geograficamente. Ressalta-se que, para aplicações como o manejo da fertilidade do solo e a avaliação da aptidão agrícola das terras em propriedades rurais, são necessários mapas em escala mais detalhada, conforme preconizado pelo Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos), que estabelece levantamentos em escalas de 1:100.000 ou superiores (Polidoro *et al.*, 2016).

A análise dos dados e da cronologia dos trabalhos destaca a importância do correto manejo da fertilidade dos solos do Cerrado para alcançar elevada produção agrícola desde o início da abertura dessa fronteira agrícola nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Atualmente, as diversas pesquisas e experimentos nesse bioma demonstram a relação direta entre o conhecimento da pedologia e da fertilidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Assim, para garantir a sustentabilidade nesse bioma, o conhecimento das características do solo deve transcender a camada arável.

Nos últimos trinta anos, o Cerrado tem sido o bioma mais impactado por distúrbios antrópicos decorrentes do avanço das fronteiras agropecuárias. De acordo com o DETER, nos primeiros quatro meses de 2023, foram abertos 2.133 km² de área, um aumento de 17% em relação ao mesmo período do ano anterior e 48% acima da média histórica. Modelos e cenários futuros indicam a possibilidade de alterações significativas, até mesmo desastrosas, na cobertura do solo do Cerrado devido ao desmatamento. Tais mudanças podem impactar o clima regional, com a redução da precipitação e alterações nos ciclos de carbono, água e outros serviços ecossistêmicos (Strassburg *et al.*, 2017). Diante disso, é imperativo realizar ações voltadas para a conservação e recuperação desse bioma, garantindo não apenas a preservação da biodiversidade, mas também as contribuições essenciais da natureza para as pessoas.

7.2 Contextualização

7.2.1 Solos do Bioma Cerrado

Além da sua exuberante diversidade vegetal, o Cerrado também se destaca pelos solos que sustentam essa rica biodiversidade. As características desses solos revelam uma complexa interação entre fatores físicos, químicos e mineralógicos, moldando a paisagem única dessa região. As características físicas do solo são muito variáveis.

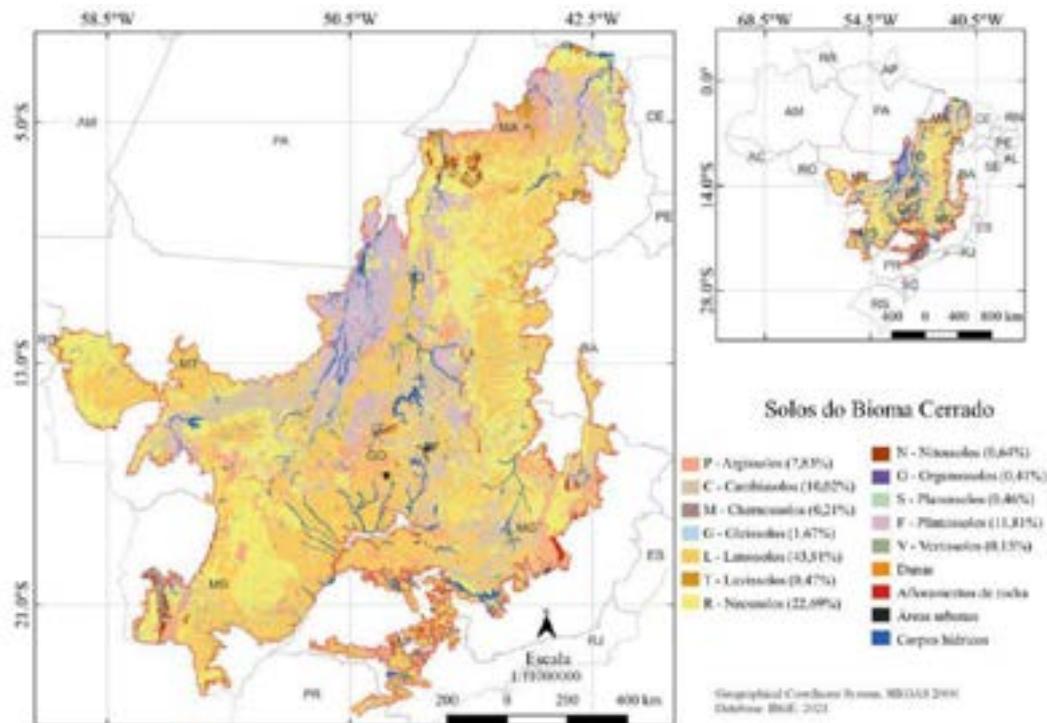
Os estudos pioneiros de Jacomine (1963, 1969) destacam uma baixa fertilidade química natural nos solos do Cerrado, traduzida por baixa capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases e saturação por bases. A saturação por alumínio não está diretamente relacionada aos altos teores desse elemento, mas sim à baixa CTC e cátions trocáveis. Essa descoberta desafia as expectativas convencionais sobre os solos tropicais e ressalta a singularidade dos solos do Cerrado. No que diz respeito aos micronutrientes, outros estudos enfatizam a adequação média de Cu, Fe e Mn, enquanto B, S e Zn revelam valores inferiores. Essa distribuição desigual de nutrientes desempenha um papel crucial nas condições de fertilidade e na saúde das plantas, destacando a necessidade de compreensão detalhada para o manejo sustentável desses solos.

O Cerradão florestado e os tipos de transição entre o Cerrado e as florestas semi-decíduais apresentam um cenário diversificado, onde a fertilidade do solo é associada a desequilíbrios nutricionais que podem impactar negativamente o desenvolvimento vegetal. Essa compreensão é essencial para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis do Cerrado. A classificação de certos Latossolos Vermelhos como "Acris ou Acriférricos" destaca sua origem e estabilidade, enquanto solos eutróficos excepcionais, como os encontrados no Complexo Ultrabásico Barro Alto e Niquelândia, desafiam a ideia de uniformidade química. Essas exceções sublinham a complexidade do Cerrado, oferecendo nichos específicos com características únicas. Outra característica marcante observada nos solos do Cerrado, especialmente nas camadas subsuperficiais, é a presença de valores positivos de ΔpH , indicando carga líquida positiva e alta capacidade de adsorção de ânions, notadamente fosfato. Isso se torna um ponto crucial para entender a dinâmica da disponibilidade de nutrientes para as plantas nesse bioma, evidenciando a importância desses solos para o ciclo biogeoquímico da região.

7.2.2 Principais classes de solo

A distribuição das ordens de solos no bioma Cerrado é apresentada na Figura 2. Observa-se o predomínio de Latossolos, seguidos de Neossolos, Argissolos, Plintossolos e Cambissolos, quando se considera o primeiro componente da associação no Mapa de Solos do Brasil (Santos *et al.*, 2011). Ainda, o somatório das ordens Latossolos e Argissolos resulta em 52% da área de Cerrado, os quais são os principais solos manejados com lavouras, pecuária e silvicultura nesse bioma (Pereira *et al.*, 2019).

Figura 2. Mapa de ordens de solo do bioma Cerrado



Fonte: Oliveira *et al.* (2023).

Os Latossolos compõem a maior ocorrência de uma única classe nos Cerrados e representam aproximadamente 44% da área total nos Cerrados brasileiros. A ordem dos Latossolos é identificada pela presença de horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico sob qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm a partir da superfície ou dentro de 300 cm, caso o horizonte A apresente espessura maior que 150 cm (Santos *et al.*, 2018). São solos formados a partir do processo pedogenético identificado como ferralitização, caracterizado pela intensa remoção de sílica, lixiviação de bases e transformações de minerais primários em secundários (Kämpf; Curi, 2012), sendo o resultado de um intenso processo de intemperização do solo e/ou de seu material de origem.

Os Latossolos compõem a maior ocorrência de uma única classe nos Cerrados e representam aproximadamente 44% da área total nos Cerrados brasileiros. Os Latossolos do Cerrado são os mais intemperizados de todos os Latossolos no Brasil, apresentando quantidades insignificantes de minerais primários intemperizáveis (<5%), e uma mineralogia de argila caolinita e/ou óxidos, resultando em capacidade de troca catiônica muito baixa. Os Latossolos nas superfícies de planação mais elevadas (>1000 m) nos Platôs do Planalto Central são os mais gibbsíticos e acrícos, com carga líquida positiva e alta capacidade de retenção de ânions.

De maneira geral, os perfis de solo vão de profundos a muito profundos, apresentam baixa saturação por bases (distróficos) e altos teores de alumínio trocável. Quanto à mineralogia, a fração argila é composta basicamente de caulinita, óxidos de ferro (hematita e goethita) e alumínio (gibbsita), minerais que podem apresentar cargas positivas em condições de elevada acidez (baixos valores de pH), padrão comumente observado nos solos do bioma Cerrado. A fração areia é composta basicamente de quartzo, com menor conteúdo de minerais mais resistentes ao intemperismo (Santos *et al.*, 2018). No nível de subordem, ocorrem no bioma Cerrado: Latossolos Vermelhos, formados a partir de rochas básicas e com texturas variando de argilosa a muito argilosa, com maior participação de hematita na fração argila; e Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, que ocorrem em maior expressão geográfica, formados, principalmente, a partir de rochas sedimentares e metassedimentares, com maior variação de textura e maior participação de goethita na fração argila (Pereira *et al.*, 2019).

Quanto ao seu uso agrícola, os Latossolos apresentam elevado potencial para sistemas intensivos e são utilizados em monocultura e cultivo convencional ou sistemas mistos (Sistema Plantio Direto - SPD e Integração Lavoura Pecuária Floresta - ILPF), como lavouras de milho, cana-de-açúcar, soja, sorgo, algodão e feijão, e menos frequentemente em sistemas agroflorestais (SAFs). O relevo com pequena declividade e a boa drenagem favorecem a mecanização e minimizam a suscetibilidade à erosão. A maior profundidade dos perfis condiciona o maior armazenamento de água e profundidade efetiva do sistema radicular, reduzindo o estresse hídrico das culturas, caso ocorram veranicos (comuns no Cerrado). A principal limitação desses solos são os atributos químicos, pois, como já citado, possuem baixa capacidade de retenção de cátions e saturação por bases, elevados teores de alumínio, além de fixação de fósforo. Contudo, a identificação dessas limitações permitiu avanços das pesquisas no Brasil em tecnologias apropriadas para o Cerrado. Assim, o melhor manejo da matéria orgânica (MO) e as técnicas de correção e adubação têm promovido aumentos na fertilidade dos solos na camada arável, com resultados que podem ser verificados no aumento crescente das produtividades obtidas em lavouras no bioma Cerrado (Pereira *et al.*, 2019).

A ordem dos Neossolos é identificada pela pequena evolução pedogenética dos solos, que são constituídos por horizonte superficial composto de material mineral ou orgânico, desde que este contenha uma espessura inferior a 20 cm e não possua horizonte diagnóstico subsuperficial (Santos *et al.*, 2018). Apresentam baixa intensidade da atuação de processos pedogenéticos, portanto têm predomínio de atributos herdados do material de origem. Entre as classes dos Neossolos no bioma Cerrado, em nível de subordem, os Neossolos Litólicos e os Neossolos Quartzarênicos são os de maior ocorrência (Oliveira *et al.*, 2017). Os primeiros são caracterizados por apresentar contato lítico nos primeiros 50 cm a partir da superfície (Santos *et al.*, 2018) e ocorrem predominantemente nas escarpas das chapadas, nas quais as elevadas declividades intensificam a remoção do solo por erosão, sendo responsável pelo seu rejuvenescimento. Quanto à distribuição, situam-se no centro-sul do Piauí, no sul do Maranhão, no nordeste do Tocantins e em algumas áreas dos estados de Goiás, de Minas Gerais, da Bahia e do Mato Grosso do Sul. Os Neossolos Quartzarênicos caracterizam-se por apresentar textura nas classes areia ou areia franca em todos os horizontes até 150 cm de profundidade a partir da superfície; quando houver contato lítico, este deve ocorrer a uma profundidade maior que 50 cm. A mineralogia da fração areia é composta predominantemente (95%) de minerais de natureza quartzosa, e dificilmente se observa a presença de minerais primários alteráveis (Santos *et al.*, 2018). Ocupam grandes áreas nos estados do Tocantins e do Piauí, além do norte de Minas Gerais, sul do Maranhão e em algumas áreas dos estados do Mato Grosso, do Mato Grosso do Sul, da Bahia e de Rondônia (Oliveira *et al.*, 2017).

Do ponto de vista de utilização agrícola, esses solos apresentam uma série de limitações. Os Neossolos Litólicos, pela pequena profundidade, são susceptíveis aos processos erosivos, tendo em vista que, durante os períodos de maior precipitação pluviométrica, ocorre a rápida saturação do solo por causa do seu pequeno volume, favorecendo o escoamento superficial. Em função desse pequeno volume, apresentam baixa capacidade de armazenamento de água e limitações ao desenvolvimento do sistema radicular, em especial as espécies de maior porte. Podem apresentar também impedimentos à mecanização, quando ocorrem cascalhos e matacões na superfície, que dificultam o preparo inicial do terreno e a aplicação de corretivos e adubos (Pereira *et al.*, 2019).

As principais limitações dos Neossolos Quartzarênicos estão associadas à textura arenosa do solo, que, além de condicionar uma baixa capacidade de troca catiônica, intensifica a decomposição da matéria orgânica, dificultando o manejo da fertilidade. Adicionalmente, a elevada macroporosidade condiciona uma baixa capacidade de armazenamento de água, favorecendo que as culturas estejam sujeitas a estresse hídrico nos períodos de menor precipitação pluviométrica. Embora sejam considerados solos com baixa aptidão agrícola, a demanda por novas áreas para agricultura nos últimos anos acarretou incorporação desses solos para o uso com pastagens e a produção de grãos, especialmente soja e milho. Nesse caso, técnicas para conservação da umidade ou mesmo irrigação e manejo da fertilidade, com aplicação de adubos diferenciada, são essenciais para manutenção dos níveis de produtividade. O monitoramento e a avaliação do impacto do uso desse solo sobre outros recursos naturais são essenciais (Pereira *et al.*, 2019).

A ordem dos Argissolos é caracterizada pelo aumento significativo do conteúdo de argila em subsuperfície, sendo esse horizonte identificado como diagnóstico B textural. Podem ser constituídos por argilas de baixa atividade ou alta atividade associada à baixa saturação por bases e/ou caráter aluminico (Santos *et al.*, 2018). São formados, principalmente, pela atuação

dos processos pedogenéticos específicos de eluviação/iluviação e/ou elutriação (Kämpf e Curi, 2012). No primeiro, as partículas de argilas dispersas em superfície são transportadas pela água que percola através dos poros de maior tamanho, posteriormente depositadas em subsuperfície, seja por condições que facilitam sua floculação, seja por cessão do transporte. A elutriação caracteriza um processo múltiplo de perda, em que ocorre remoção seletiva das partículas mais finas (argila) no horizonte superficial, havendo, portanto, um aumento relativo no conteúdo de argila em profundidade, favorecendo a formação do gradiente textural (Oliveira *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2019).

Os Argissolos são formados a partir de diversos materiais de origem e encontram-se em diferentes pontos da paisagem no bioma Cerrado, associados, com maior frequência, à paisagem em que são observados Latossolos. Ocupam 12% do bioma e estão localizados, sobretudo, nas zonas de transição com florestas, em ambientes mais úmidos do estado de Minas Gerais, oeste de Mato Grosso e leste do Mato Grosso do Sul (Macedo, 1996). Quanto à sua utilização agrícola, a principal limitação é a suscetibilidade à erosão. O aumento no teor de argila em profundidade é responsável por redução da permeabilidade nos horizontes subsuperficiais, o que favorece o fluxo lateral da água e, dessa forma, a remoção de horizontes superficiais pela erosão hídrica, processo que é intensificado em áreas de maior declividade. Em geral, possuem baixa saturação por bases (distróficos), capacidade de troca catiônica, elevada acidez e limitações quanto à fertilidade natural. São utilizados com culturas perenes, silvicultura com predomínio de eucalipto e seringueira, além de extensivas áreas com pastagens (Pereira *et al.*, 2019).

Os Plintossolos ocorrem em cerca de 10% das áreas do bioma Cerrado, e a classe de maior ocorrência são os Plintossolos Pétricos Concrecionários. São encontrados, principalmente, nas áreas dos chapadões e em suas bordas, distribuídos no leste e no norte de Goiás, no sul do Maranhão, em algumas regiões do Piauí e no centro-sul do Mato Grosso. Esse grande grupo é caracterizado por sua constituição de no mínimo 50%, por volume, de material grosso de nódulos ou concreções de ferro (Santos *et al.*, 2018). Apesar de as condições atuais de drenagem nesse ambiente serem contrastantes com o processo de plintitização, a formação dessas concreções e das lateritas está associada a períodos geológicos passados, em que as superfícies se encontravam em cotas mais baixas que a atual e com maior influência do lençol freático (Oliveira *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2019).

No bioma Cerrado, também são observados Plintossolos Argilúvicos, que apresentam horizonte B textural ou caráter argilúvico coincidindo com horizonte plíntico, e Plintossolos Háplicos, que não apresentam nenhuma característica distintiva das demais classes (Santos *et al.*, 2018). Ambas as classes predominam nas áreas de planícies, em condições de drenagem imperfeita ou mesmo mal drenados. Estão situados, sobretudo, nas margens do rio Araguaia, abrangendo parte dos estados de Tocantins e de Goiás, dos rios Grande, Preto e Corrente no estado da Bahia e em algumas áreas dos estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul. Quanto às principais limitações ao uso agrícola, os Plintossolos possuem características muito variáveis em função do material de origem e do relevo, além de seu grau de intemperismo. Embora predominem solos com baixa fertilidade natural e distróficos, por apresentarem um grande volume de concreções, os Plintossolos Pétricos Concrecionários possuem fortes restrições quanto à mecanização nas operações de preparo do solo e na colheita. Adicionalmente, os Plintossolos Argilúvicos e Háplicos, por ocorrerem, em geral, nas regiões de planícies, têm restrição à drenagem (Pereira *et al.*, 2019).

Os Cambissolos ocorrem em 9% das áreas do bioma Cerrado, com predomínio, em geral, dos Cambissolos Háplicos. Esses solos são encontrados, principalmente, no centro-sul de Minas Gerais, no leste do Mato Grosso e em algumas regiões de Goiás (Oliveira *et al.*, 2017). Podem ocorrer em diversos pontos da paisagem, formados a partir de formações geológicas distintas; por esse motivo, apresentam uma grande variabilidade dos atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Em sua maioria, possuem textura média e baixa saturação por bases, porém aqueles formados a partir de rochas básicas têm textura mais argilosa e elevada saturação por bases (eutróficos). Em áreas de declividades mais acentuadas, possuem pequena profundidade efetiva, com a presença de cascalhos e matacões. Porém, quando localizados em áreas de planaltos, em superfícies com relevo menos movimentado, não são observadas essas frações mais grossas, mas apresentam perfis mais profundos (Pereira *et al.*, 2019).

Por causa da ampla variabilidade nos atributos dos Cambissolos, ocorrendo nas mais variadas condições de relevo e material de origem, as limitações do uso agrícola também variam bastante. Os Cambissolos em relevo mais movimentado apresentam maior suscetibilidade à erosão e impedimentos à mecanização. Já aqueles localizados em áreas de relevo plano e elevadas, nos planaltos, possuem melhor armazenamento de água e maior facilidade de mecanização, porém, em geral, têm limitações de fertilidade, sendo distróficos e com elevados teores de alumínio trocável (Pereira *et al.*, 2019).

7.3. Mercado de Carbono e o Carbono do Solo

7.3.1 Mercado de Carbono

O mercado de carbono teve sua origem na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC), durante a ECO-92, no Rio de Janeiro. No entanto, sua proeminência cresceu significativamente com a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, em Quioto no Japão. Uma de suas decisões cruciais, ficou estabelecido que os países signatários assumiriam compromissos mais robustos para a redução das emissões de gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa (IPAM, 2023).

O Protocolo de Quioto estabeleceu que os países desenvolvidos deveriam definir metas para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), enquanto permitia que os países em desenvolvimento contribuíssem para o alcance dessas metas de maneira mais eficiente em termos de custos. Contudo, para a entrada em vigor do protocolo, era necessário o apoio de 55% dos países, representando 55% das emissões globais de GEE. Isso ocorreu apenas em 2004, quando a Rússia ratificou o acordo.

O principal objetivo do Protocolo de Quioto tornou-se a restrição e redução das emissões de GEE por parte dos países signatários. A partir desse marco, a redução das emissões passou a ser encarada como um valor econômico, incentivando uma abordagem mais sustentável e eficaz na gestão ambiental.

A implementação efetiva do mercado de carbono ocorreu em 2005, quando foi estabelecido um sistema no qual países que, até então, não possuíam metas compulsórias de redução de emissões, poderiam desenvolver projetos capazes de gerar Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). Estas, por sua vez, tornavam-se passíveis de negociação com nações que possuíam metas de redução estabelecidas pelo Protocolo (Prolo *et al.*, 2021; Vargas *et al.*, 2021).

O arranjo de colaboração entre países em desenvolvimento e desenvolvidos, visando atender às metas de redução preestabelecidas, foi denominado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Estas metas, estipuladas para serem alcançadas até 2012, estabeleceram a base para a criação de um mercado internacional de créditos de carbono. Nesse contexto, a demanda por esses créditos originava-se dos países vinculados ao cumprimento de suas metas, enquanto a oferta provinha dos países que hospedavam os projetos de redução de emissões de GEE (ICC Brasil - WayCarbon, 2021; Vargas *et al.*, 2021).

Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivale a um crédito de carbono, podendo ser transacionado no mercado internacional. A diminuição das emissões de outros gases, igualmente contribuintes para o efeito estufa, pode ser convertida em créditos de carbono, através da aplicação do conceito de equivalência em carbono.

7.3.2 Tipos de Mercado de Carbono

Os mercados de crédito de carbono proporcionam a empresas, organizações e indivíduos a oportunidade de compensar suas emissões (GEE) ao adquirirem créditos gerados por projetos destinados à redução de emissões ou sequestro de carbono. Essencialmente, esses mercados visam transferir o ônus social das emissões para os agentes emissores, desempenhando um papel fundamental no controle do aquecimento global e na mitigação das mudanças climáticas. Existem dois tipos principais de mercados de carbono: o regulado e o voluntário (BNDES, 2023).

O mercado de carbono regulado teve sua origem em decorrência do Protocolo de Quioto e da crescente urgência em lidar com as mudanças climáticas. Nesse contexto, algumas das nações mais significativas no que diz respeito ao aquecimento global assumiram o compromisso de reduzir suas emissões de GEE. Esse comprometimento resultou na implementação de obrigações legais para as empresas operando em seus territórios, as quais incluem limites estabelecidos para as emissões. Adicionalmente, as empresas têm a opção de adquirir créditos de carbono de mecanismos estipulados no Protocolo de Quioto, permitindo-lhes compensar as emissões que excedem as metas estabelecidas (*Sustainable Carbon*, 2023).

A ideia por trás desses mercados de carbono regulados é criar incentivos econômicos para as empresas reduzirem suas emissões de GEE, ao mesmo tempo em que oferecem flexibilidade para aquelas que enfrentam desafios na redução imediata. Esses esforços fazem parte de iniciativas mais amplas para combater as mudanças climáticas e alcançar metas de redução de emissões globais.

A Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal do Brasil apresentou o Projeto de Lei (PL) nº 412/2021, o qual propõe a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Este projeto foi aprovado pelo Senado, marcando um passo significativo em direção à regulação do mercado de carbono brasileiro.

A presente Lei abrange as atividades, fontes e instalações localizadas no território nacional que emitem ou possam emitir gases de efeito estufa, estando sob a responsabilidade de operadores, sejam pessoas físicas ou jurídicas. Não se enquadram nas categorias reguladas, e, portanto, não estão sujeitas às obrigações estabelecidas pelo Sistema Brasileiro de Controle de Emissões (SBCE), a produção primária agropecuária, assim como os bens, benfeitorias e infraestruturas situados no interior de imóveis rurais diretamente associados a ela (Brasil, 2022).

Adicionalmente, não serão consideradas para a imposição de obrigações no âmbito do SBCE as emissões indiretas provenientes da produção de insumos ou matérias-primas agropecuárias. As emissões líquidas ocorridas em áreas rurais, que estejam sob posse ou controle do operador da atividade, fonte ou instalação regulada, e que estejam integradas aos seus processos de produção, serão contabilizadas em suas reconciliações periódicas, conforme estabelecido em regulamentação expedida pelo Poder Executivo, para fins de cumprimento das obrigações do SBCE.

É relevante ressaltar que eventual excedente nas remoções, que ultrapasse as emissões, não será automaticamente convertido em Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões, devendo ser submetido ao processo de registro no SBCE.

Conforme apontado por alguns especialistas, este Projeto de Lei (PL) apresenta alguns desafios e incertezas. No entanto, dado que o processo legislativo está em curso, surgirão oportunidades para ajustes e aprimoramentos. Há uma expectativa considerável de que o mercado de carbono nacional seja regulamentado por meio desta Lei (Munhoz, 2023).

O mercado de carbono voluntário emergiu em paralelo ao Protocolo de Quioto, por meio das Reduções Voluntárias de Emissões. Nesse cenário, empresas e instituições que não tinham obrigações legais de reduzir suas emissões, mas desejavam compensá-las, tinham a opção de adquirir créditos de carbono no novo mercado (Prolo *et al.*, 2021; Vargas *et al.*, 2021). Esses créditos passam por auditoria por parte de uma entidade independente, embora não estejam sujeitos a registros da ONU, não sendo contabilizados como metas de redução para os países participantes do acordo internacional.

Algumas características distintivas dos mercados voluntários incluem: os créditos não são contabilizados como reduções de metas nacionais; a operação é marcada por uma menor carga burocrática; e a possibilidade de inclusão de projetos com estruturas não reconhecidas pelo mercado regulado, como é o caso da Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD). Vale ressaltar que o Chicago Climate Exchange, localizado nos Estados Unidos, figura como o principal mercado voluntário.

O processo de geração e comercialização de créditos no mercado de carbono voluntário compreende quatro etapas fundamentais, nas quais diferentes agentes desempenham papéis de extrema importância ao longo de todo o procedimento. As fases consistem na identificação da metodologia a ser utilizada e na elaboração do projeto gerador dos créditos, seguidas pela validação e subsequente monitoramento do projeto, culminando na certificação dos créditos gerados. Após o registro do projeto e a certificação dos créditos por ele gerados, estes tornam-se aptos a serem comercializados para a compensação de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Verra, 2021; Vargas *et al.*, 2021).

O mercado de carbono voluntário no Brasil é predominantemente impulsionado por projetos de Energia, representando 63% do total, seguidos por iniciativas relacionadas à Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU), que compreendem 25% (Vargas *et al.*, 2021). Dentro do setor AFOLU, os projetos concentram-se principalmente na Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD) e REDD+. Este último vai além do desmatamento evitado e da recuperação de florestas, abrangendo a conservação, o manejo sustentável e o aumento dos estoques de carbono nas florestas. Isso evidencia uma abordagem mais holística e sustentável no enfrentamento das emissões de carbono associadas às práticas de uso da terra. Uma das distinções fundamentais entre os dois mercados reside na precificação

dos créditos de carbono. Atualmente, os preços no mercado de carbono voluntário são mais elevados em comparação com os regulados (*Sustainable Carbon*, 2023).

Além dos mencionados tipos de mercado, outra via para financiar projetos de redução de emissões ou sequestro de carbono são os chamados fundos voluntários. Suas características primordiais incluem: não estarem vinculados ao mecanismo de mercado, o que implica que não geram créditos de carbono; a doação realizada não pode ser subtraída das metas de redução dos países doadores; e a capacidade de acolher projetos com estruturas não reconhecidas pelo mercado regulado, como é o caso do REDD. Dois exemplos notáveis desses fundos são o *Forest Carbon Partnership Facility* do Banco Mundial e o Fundo Amazônia, sob responsabilidade do governo brasileiro (IPAM, 2023).

7.3.3 Carbono do Solo

O solo é um grande reservatório de carbono C e exerce papel fundamental sobre a emissão de GEE e consequentes mudanças climáticas globais (Carvalho *et al.*, 2010). De acordo com as estimativas do IPCC (2006), os compartimentos ambientais apresentam quantidades distintas de carbono: aproximadamente 730-750 PgC na atmosfera, 470-655 PgC na vegetação e 1.500-2.000 PgC no solo, a uma profundidade de um metro (com cerca de 800 PgC armazenados nos primeiros 30 cm). Esses dados revelam que há duas a três vezes mais carbono nos solos, na forma de matéria orgânica do solo (MOS), do que o presente na vegetação. Além disso, o solo armazena aproximadamente o dobro de carbono em comparação com a atmosfera (Costa Junior, 2020).

Uma parcela significativa de todo o carbono orgânico presente no solo está na forma de MOS. No entanto, práticas de manejo não conservacionistas podem resultar na rápida decomposição desse material orgânico no solo, exacerbando o efeito estufa devido à emissão de GEE (Cerri *et al.*, 2007). Por outro lado, o aumento do estoque de MOS é um processo lento e necessita de um manejo adequado, especialmente em regiões de clima tropical, onde a taxa de decomposição é mais acentuada devido às elevadas temperaturas e umidade do solo (Six *et al.*, 2002).

A MOS influencia fortemente a desempenha um papel crucial na melhoria da produtividade das plantas e na manutenção de aspectos ambientais essenciais. Sua contribuição vai além do fornecimento de nutrientes para as plantas, estendendo-se à influência positiva sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. No Cerrado, o incremento ou a manutenção da MOS é dificultada devido às condições climáticas e às irregularidades na distribuição de precipitação pluvial.

No entanto, a manutenção da palha na superfície do solo, somada à ausência de revolvimento do solo, princípios básicos da adoção do SPD, além de reduzir a emissão de CO₂ para a atmosfera, atua no aumento do estoque de C no solo, trazendo ainda outros benefícios às culturas (Six *et al.*, 2002; Foley *et al.*, 2005; Costa Junior, 2020).

Segundo Bernoux; Volkoff (2006), as taxas de carbono (C) no solo na região do Cerrado podem variar de 0,4 a 1,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 40 cm durante a transição do sistema de plantio convencional (SPC) para o SPD. Estudos adicionais realizados nessa região revelaram aumentos nos estoques de C do solo em sistemas de Integração Lavoura Pecuária (ILP) sob SPD, especialmente quando comparados aos de áreas sob SPD sem a presença de forrageiras

na rotação ou sucessão de cultivos. Carvalho *et al.* (2009), também na região do Cerrado, destacam que a taxa de acúmulo de C durante a conversão do sistema de SPD para ILP variando de 0,8 a 2,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Além disso, há um grande potencial de acumular carbono com a recuperação de pastagens degradadas no Cerrado. Com base nos dados da Lapig (2020), verifica-se que 37% das pastagens, abrangendo cerca de 23,7 milhões de hectares, apresentam algum grau de degradação no cerrado. Por outro lado, diversos estudos destacam o potencial de recuperação de pastagens degradadas, evidenciando a capacidade de acumulação de carbono, o que permite manter os níveis de estoque desse elemento no solo equivalentes ou superiores aos encontrados na vegetação nativa (Braz *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2016). Estudos evidenciam sequestro de C no solo variando de 0,36 a 0,61 tC ha⁻¹ ano⁻¹ com a recuperação de pastagens no Cerrado (Maia *et al.*, 2013; Oliveira, 2018). A ciclagem eficiente do robusto sistema radicular, aliada à prática mínima ou nula de revolvimento do solo, emerge como um fator fundamental para o êxito no acúmulo de carbono quando se recupera áreas degradadas.

Esses resultados indicam o potencial positivo da adoção de práticas agrícolas sustentáveis, como o SPD, ILP e recuperação de pastagens, na promoção do sequestro de carbono no solo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a melhoria da qualidade do solo.

7.4 Considerações finais

A adoção de práticas de manejo mais conservacionistas, como o SPD, a implementação de sistemas integrados de produção (ILPF) e recuperação de pastagens aumenta a produção do sistema agropecuário, tornando-o mais eficiente, além disso, contribuem para a redução das emissões de gases na atmosfera e desempenham um papel crucial na incorporação e armazenamento de carbono no solo. Essa captura de carbono, anteriormente presente na atmosfera na forma de CO₂, destaca o potencial positivo das práticas sustentáveis na agricultura. Além disso, a implementação de técnicas apropriadas de manejo, focadas na manutenção ou mesmo no acúmulo de carbono no sistema solo-planta, emerge como uma estratégia valiosa para mitigar os impactos do aquecimento global.

Além de aumentar a produtividade, a adoção de práticas que incrementam o C do solo, pode ser uma possível fonte de renda aos produtores através do mercado voluntário de carbono e/ou pelo aumento da biodiversidade pelo *Nature-Based Market* (mercado baseado na natureza). Portanto, ao adotarem essas práticas sustentáveis, irão não apenas promovermos a eficiência agrícola, mas também desempenhar um papel essencial na preservação ambiental, contribuindo para um equilíbrio mais saudável entre a produção alimentar e a gestão responsável dos recursos naturais.

Referências

BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. Soil carbon stock in soil ecoregions of Latin America. *In*: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. *et al.* **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York, Haworth, 2006. p.65-75.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Como Funcionam os Mercados de Carbono**. Disponível em:

<https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/blogdodesenvolvimento/detalhe/Infografico-como-funcionam-os-mercados-de-carbono/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

BRASIL. Comissão de Meio Ambiente do Senado Federal. **Projeto de Lei Nº 412 de 2022**.

BRAZ, *et al.* Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 77:914–928. 2013.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:277-289, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J. *et al.* Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil Tillage Res.**, 103:342-349, 2009.

CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M. *et al.* Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Sci. Agric.**, 64:83-99, 2007.

COSTA JUNIOR, C. 2020. **Potencial de captura de carbono no solo a partir da reabilitação de pastagens degradadas no Cerrado**. Piracicaba -SP, Imaflora, 83p.

FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P. *et al.* Global consequences of land use. **Science**, 309:570–574, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Escala 1:5.000.000.

ICC Brasil - International Chamber of Commerce Brasil - WayCarbon (2021).

Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono – Relatório 2021. Disponível em: https://www.iccbrasil.org/media/uploads/2021/09/27/oportunidades-para-o-brasil-em-mercados-de-carbono_icc-br-ewaycarbon_29_09_2021.pdf. Acesso em: dez. 2023.

IPAM - Instituto de Pesquisa Ambiental. **O que é e como funciona o mercado de carbono?** Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change Eggleston, S. *et al.* **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC/IGES, Hayama, Japan. 2006.

JACOMINE, P. K. T. **Considerações gerais sobre alguns solos de Cerrado**. In: Reunião Brasileira do Cerrado, I. Sete Lagoas, Minas Gerais: DPEA, SIA, Ministério da Agricultura, 1963, p. 131–136 (Bol. Tec. 15).

JACOMINE, P. K. T. **Descrição das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de alguns perfis de solos sob vegetação de Cerrado**. Bol. Tec. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (11):1–126, 1969.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Formação e evolução do solo (Pedogênese)**. In: Ker, J. C., Schaefer, C. E. G. R., Vidal-Torrado, P. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302. 2012.

LAPIG. Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento: **Atlas das Pastagens**. 2022. Disponível em: <https://atlasdaspastagens.ufg.br/map>. Acesso em: 20 nov. 2023.

-
- MAIA, S. M. F. *et al.* Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 75–84, 2013.
- MUNHOZ, L. 2023. **Regulação do Mercado de Carbono Brasileiro**. Sustentabilidade. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas (OCBio/FGV).
- OLIVEIRA, S. P. *et al.* Conversion of forest into irrigated pasture I. Changes in the chemical and biological properties of the soil. **Catena**, v. 137, p. 508–516, 2016.
- OLIVEIRA, D. C. de. Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil. **Tese (Doutorado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**. 82 p. Piracicaba, 2018.
- OLIVEIRA, V. A.; JACOMINE, P. K. T.; COUTO, E. G. Solos do Bioma Cerrado. *In*: CURTI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiro**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 177-226. 2017.
- OLIVEIRA, V. A.; SANTOS, G. G.; KER, J. C. *et al.* **Soils of Cerrados, the Brazilian Savannas**. *In*: The Soils of Brazil (pp. 129-173). Cham: Springer International Publishing. 2023.
- OLIVEIRA, D. M. D. S.; TAVARES, R. L. M.; LOSS, A. *et al.* Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 1-20, 2023.
- PEREIRA, M. G.; PINHEIRO JUNIOR, C. R.; ANJOS, L. H. C. dos. *et al.* **Aplicações da pedologia na fertilidade do solo com ênfase em solos da região do Cerrado: além da camada arável**. *In*: SEVERIANO, E. C.; MORAES, M. F. DE; PAULA, A. M. de (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 694-728. 2019.
- POLIDORO, J. C.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; LUMBRERAS, J. F. *et al.* **Programa nacional de solos do Brasil (PronaSolos)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2016.
- PROLO, C. D.; PENIDO, G.; SANTOS, I. T. *et al.* **Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris**. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade. 2021. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>. Acesso em: dez. 2023.
- SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa. 2018.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K. *et al.* Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, 22:755-775, 2002.
- STRASSBURG, B. B.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R. *et al.* Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, 1(4), 0099. 2017.
- SUSTAINABLE CARBON. **Entenda o Mercado de Carbono Voluntário e Regulado**. 2023. Disponível em: <https://www.sustainablecarbon.com/blog/mercado-voluntario-x-regulacao-diferenca-de-precos> . Acesso: 20 nov. 2023.

TERRA, M. C.; NUNES, M. H.; SOUZA, C. R. *et al.* The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savannas. **Science of The Total Environment**, v. 867, 1-13, 2023.

VARGAS, D. B.; DELAZERI, L. M. M.; FERREIRA, V. H. P. **Mercado de carbono voluntário no Brasil: na realidade e na prática**. Observatório de Bioeconomia – FGV, São Paulo, 2021, 31p.

VERRA. **Verified Carbon Standard Projects & Programs**. 2021. Disponível em: <https://verra.org/project/vcs-program/projects-and-jnr-programs/>. Acesso: 20 out. 2023.

CAPÍTULO 8

DIVERSIDADE DE MICRORGANISMOS E SUA IMPORTÂNCIA ECONÔMICA PARA A SUSTENTABILIDADE DA AGRICULTURA NO CERRADO BRASILEIRO

**Andrea Carla Caldas Bezerra
Flávia Virgínia Ferreira de Arruda
Inácio Pascoal do Monte Júnior
Leonardo de Oliveira Barbosa
Sara Dantas Rosa**

Resumo

O solo é um importante habitat para sobrevivência da vida na Terra, e é a base de todos os ecossistemas, abrigando a maior biodiversidade do mundo, contudo ainda é associado apenas a produção de alimentos. É no solo onde se encontra grande parte da biodiversidade da Terra, proporcionando a vida, participando dos ciclos dos nutrientes, onde ocorre a decomposição da matéria orgânica, regulação do clima e produção de alimentos. É nele onde boa parte da vida é gerada e vive. O Cerrado brasileiro é um dos maiores e mais importantes biomas, tendo uma grande biodiversidade, está presente em oito estados fazendo fronteira com outros biomas, o que enriquece ainda mais sua biodiversidade. Os solos do Cerrado são caracterizados pela baixa fertilidade natural e excelentes condições físicas para o manejo, sendo um dos principais pólos agrícolas do Brasil. Sua fauna e flora é de extrema importância e tem no solo o habitat de diversos fungos e bactérias que participam em diferentes processos biológicos e possuem potencial para atuarem na supressão de pragas e doenças, fazendo parte de produtos como Bionematicidas, Biofungicida, Bioinseticidas e Promotores de Crescimento de Plantas (Inoculantes). Outro grupo de microrganismo também presente nos solos do Cerrado são os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) que formam associação com raízes de plantas ajudando as mesmas na absorção de nutrientes e sequestro de carbono. O uso consciente do solo do bioma Cerrado é fundamental para manutenção da biodiversidade microbiana no solo, funcionamento dos serviços ecossistêmicos e produção agrícola sustentável.

8.1 Introdução

O que é o solo? Existem várias definições que variam de acordo com a área de estudo e o interesse que cada um desperta por ele. Do ponto de vista científico o solo é uma mistura de componentes minerais, orgânicos, gases, líquido, macrorganismos e microrganismos. Estendendo a definição de solos para a área ambiental e agrícola, adiciona-se ao conceito, a capacidade de fornecer nutrientes essenciais para o crescimento vegetal, água e oxigênio, e base de sustentação para o desenvolvimento das plantas. Assim, o solo é formado por uma fase sólida composta por minerais e matéria orgânica e uma outra fase correspondente a poros que pode ser

ocupado por água ou gases. A parte viva está contida na matéria orgânica do solo, correspondendo a 5% dessa fração, chamada de biomassa, composta por microrganismos (70%), macrofauna e raízes (Mendes *et al.*, 2018).

O solo é responsável por abrigar a maior biodiversidade do planeta, uma grama contém cerca de 10^9 células de bactérias, 10^6 células de actinomicetos e 100 mil fungos (Mendes *et al.*, 2018). A quantidade e diversidade de microrganismos presentes estão diretamente relacionadas às características do solo e a pequenos micro-habitat que favorecem a diversificação. É a biodiversidade edáfica que garante a sua funcionalidade, pois diferentes microrganismos podem desempenhar a mesma função no solo, na ausência de um microrganismo específico outro desempenha a mesma função.

Além disso, a diversidade microbiana dos solos é responsável pelos serviços ecossistêmicos (Andreote; Cardoso, 2016). Dentre eles, os processos bioquímicos que controlam as transformações dos elementos químicos e a transferência de energia e nutrientes como a decomposição de materiais orgânicos, mineralização de compostos orgânicos, transformação inorgânica de N e S, fixação biológica de nitrogênio, produção de metabólitos, degradação de xenobióticos, entre outros. Além disso, os microrganismos são responsáveis pela regulação das comunidades microbianas, em áreas agrícolas a microbiota do solo atua contra a invasão de patógenos, produzem composto promotores do crescimento de plantas, fazem associações que favorecem o uso de nutrientes, como os fungos micorrízicos, sendo os microrganismos responsáveis pela preservação da qualidade edáfica do solo. A pedogênese também é um importante serviço ecossistêmico, os microrganismos são precursores da formação do solo, são importantes colonizadores primários de rochas, estão envolvidos no intemperismo, na produção de enzimas e na sua agregação. Além disso, os microrganismos são importantes na área de fármacos, na indústria alimentícia, e em vários outros ramos.

Ainda são poucos os estudos sobre a microbiologia do solo dos principais biomas brasileiros, devido a extensão territorial e dificuldade de estudos amplos (Andreote; Cardoso, 2016). No entanto, o maior bioma atual é o agrícola que ocupa 78 milhões de ha, segundo dados da CONAB safra 22/23, um bioma completamente antropizado, que se sobrepõe aos biomas naturais. Nesse bioma as propriedades químicas, físicas e biológicas são alteradas, sendo importante entender o seu funcionamento e o efeito da mudança do uso do solo sobre as comunidades microbianas e as possibilidades de uso dos mesmos para a obtenção de maior produtividade agrícola. O cultivo do solo leva a seleção de determinados grupos microbianos reduzindo a biodiversidade em solos agrícolas (Andreote; Cardoso, 2016).

O bioma Cerrado foi o que mais sofreu alterações nas últimas décadas, principalmente em relação ao uso agrícola. Os solos do bioma Cerrado são compostos em sua maioria por Latossolos que tem como características alto grau de intemperismo, são solos profundos, e bem drenados, pH ácido, distróficos, com baixa fertilidade natural (Sousa; Lobato, 2004). Mesmo diante de características químicas não tão favoráveis à agricultura, a produção agrícola nesse Bioma foi estimulada por diversos planos governamentais por possuir terras que são favoráveis para mecanização agrícola e solos com boas características físicas. Além disso, sabia-se que com um bom manejo da fertilidade os solos seriam produtivos.

A agricultura foi tomando cada vez mais espaço no Bioma Cerrado, e com bom manejo químico do solo, o uso de corretivos e fertilizantes chegou-se a elevadas produções jamais imaginadas para os solos do Cerrado. No entanto, o uso intensivo de forma inadequada dos

solos dessa região está levando a degradação química, física e biológica, consequentemente diminuindo a produtividade dos solos. Em algumas áreas já é possível observar pelo menos um dos três níveis de degradação. Dados da FAO (2015) revelam que cerca de 33% dos solos do mundo estão em estados de moderada a alta degradação, tendo como causas a erosão, perda e matéria orgânica do solo, desbalanço nutricional e compactação. Além disso, a transformação do Bioma Cerrado em lavouras leva ao desequilíbrio das comunidades microbianas.

Sabe-se que, para um bom funcionamento do solo, é necessário que haja um equilíbrio entre os componentes químicos, físicos e biológicos do solo. Além da adubação, é fundamental adotar práticas agrícolas que incorporem matéria orgânica e mantenha a diversidade vegetal no solo, contribuindo para manutenção da diversidade microbiana, consequentemente melhorando a estrutura química e física do solo. O uso de biológicos, práticas de manejo conservacionistas, aliadas ao uso de insumos que promovam o crescimento da atividade biológica e manutenção da diversidade biológica, são uma das alternativas para a preservação da qualidade do solo.

8.2 Contextualização

8.2.1 Diversidade de microrganismos e a sua importância econômica

A) Inoculantes

Analisando a população microbiana do solo do Cerrado, observa-se que o maior desafio na avaliação da diversidade microbiana está na correlação com as diferentes formações vegetais, tipos de solo, sazonalidade das chuvas, incêndios anuais e diferentes usos da terra. Alguns "gêneros de bactérias" são encontrados em maior abundância no Bioma Cerrado como Acidobactérias, *Bacillus* e *Paenibacillus* (Firmicutes), sendo os dois últimos comumente descritos em terras cultiváveis. As Actinobactérias, representadas por espécies de *Streptomyces*, são abundantes nas formações de campos e florestas caducifólias. Assim como às bactérias, a distribuição dos fungos também está relacionada às diferentes formações vegetais. Ascomycota e Basidiomycota são os grupos mais abundantes entre os fungos descritos nos solos do Cerrado brasileiro (Procópio; Barreto, 2021).

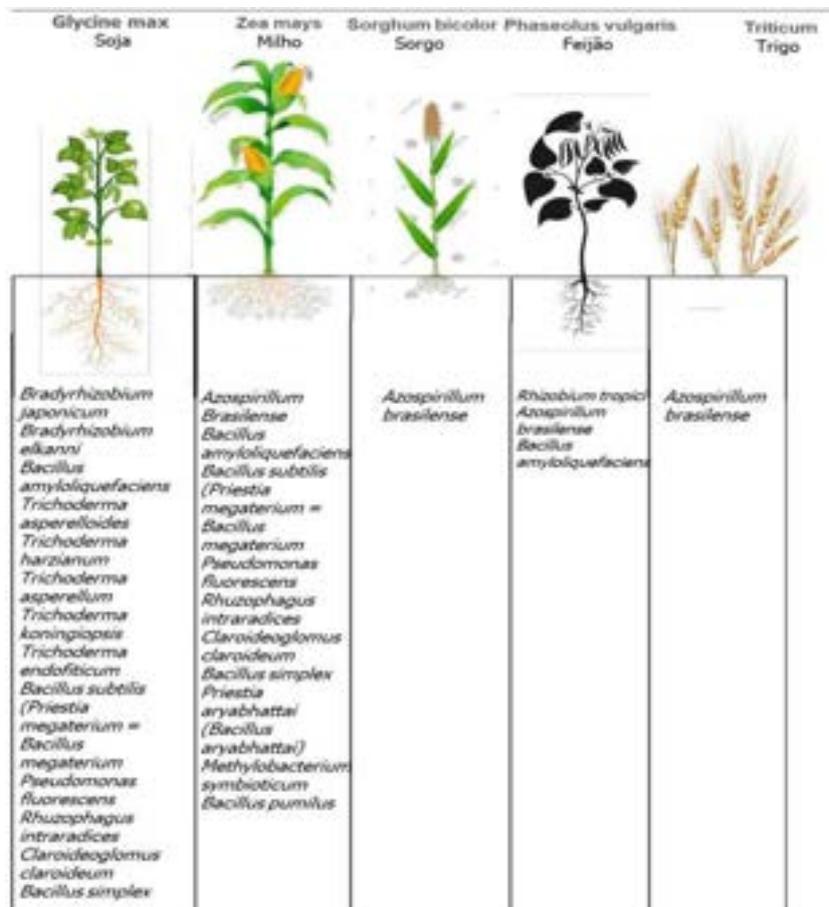
Devido ao preparo intensivo do solo cultivado as populações de microrganismos são reduzidas. No entanto, podem ser adicionados na forma de Bioinsumos, como os inoculantes. Segundo a Instrução Normativa SDA/MAPA 13/2011, inoculante é "o produto que contenha microrganismos vivos com atuação favorável ao crescimento de plantas". Dentre eles, destacam-se em maior número, as bactérias fixadoras de nitrogênio associativas e os rizóbios (Figura 1). E os mecanismos de ação mais pesquisados incluem a liberação de nutrientes (como nitrogênio, fósforo, ferro e potássio), a produção de fitohormônios e de metabólitos que conferem resistência sistêmica a doenças. A introdução desses microrganismos por meio de inoculação, proporciona à planta uma maior resistência a condições adversas, como, por exemplo, mudanças climáticas desfavoráveis.

Durante o estudo dos ciclos biogeoquímicos foram descobertos os mecanismos de promoção do crescimento vegetal influenciados pelos microrganismos. O nitrogênio atmosférico (N₂) entra no solo através da fixação biológica de nitrogênio, um componente vital para a promoção do crescimento das plantas. Bactérias dos gêneros *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* e *Sinorhizobium*, por exemplo, estabelecem associação com leguminosas formando nódulos nas raízes. Bactérias associativas

e de vida livre *Azospirillum* e *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Burkholderia*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum* e algumas cianobactérias (*Anabaena*, *Brasilonema*, *Tolypothrix* e *Nostoc*) estabelecem associação benéfica com as raízes convertendo o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis. Essa interação não só enriquece o solo em N, mas também melhora a eficiência no uso desse nutriente, contribuindo para a sustentabilidade agrícola. O resultado é uma relação mutualística entre as plantas e as bactérias, beneficiando ambas as partes e exemplificando a importância das interações microrganismo-planta no contexto do Cerrado brasileiro.

O determinante da disponibilidade de fósforo no solo depende do ciclo biogeoquímico do ambiente e das populações microbianas. A relação entre os microrganismos solubilizadores e as raízes das plantas é fundamental para o desenvolvimento das plantas no bioma Cerrado e para a produtividade agrícola. Ao associarem-se às raízes das plantas, os microrganismos liberam ácidos orgânicos e enzimas que facilitam a solubilização de fosfatos insolúveis e minerais de potássio, ferro e zinco no solo. Entre os principais microrganismos disponibilizadores destes elementos estão os gêneros *Acidothiobacillus*, *Arthrobacter*, *Aspergillus*, *Bacillus*, *Cladosporium*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* e os fungos micorrízicos arbusculares - FMA. Esse processo não só fornece nutrientes essenciais para as plantas, mas também fortalece o sistema radicular, aumentando a capacidade das plantas de absorver água e nutrientes, além de conferir resistência a doenças e estresses ambientais.

Figura 1 - Microrganismos utilizados como inoculantes nas diferentes áreas cultivadas presentes no bioma Cerrado



Fonte: App Bioinsumos - MAPA (2024).

Os microrganismos podem produzir fitohormônios, que são substâncias químicas semelhantes aos hormônios vegetais, como auxinas, giberelinas e citocininas, pois atuam na sua fisiologia promovendo o crescimento radicular, formação de raízes adventícias, atuando no fechamento e abertura dos estômatos e desta forma melhorando a sua capacidade de absorver e utilizar a água de forma mais eficiente.

Os estresses ambientais representam um desafio significativo para as plantas em ambientes naturais ou cultivados, diminuindo suas atividades metabólicas e enfraquecendo suas defesas naturais. No entanto, os microrganismos, podem produzir substâncias osmoprotetoras que ajudam as plantas a conservar água, como a trealose, e estimulam a síntese de moléculas antioxidantes nas plantas, que auxiliam na proteção contra danos oxidativos causados pelo estresse hídrico

Os diferentes mecanismos de ação dos microrganismos para promoção do crescimento vegetal são importantes na agricultura sustentável, pois possibilitam reduzir a dependência de fertilizantes químicos e outros insumos agrícolas, além de contribuir para o aumento da produção de alimentos de forma mais natural e equilibrada.

B) Bionematicidas, Biofungicidas e Bioinseticidas

A compreensão das interações sinérgicas entre diferentes grupos de microrganismos e plantas é essencial. Sinergias positivas entre bactérias, fungos, nematóides, plantas e diferentes ordens de animais (Figura 2) podem criar microecossistemas no solo que promovem o crescimento e a saúde das plantas de maneira equilibrada e sustentável. Entretanto, como é de conhecimento, nem todos os organismos presentes nos solos são benéficos, existem alguns fungos e bactérias que são fitopatogênicas como também nematóides e insetos nocivos, representando desafios para o equilíbrio e a saúde do solo.

Figura 2 - Interação entre microrganismos, solo e planta



Fonte: Os Autores (2024).

Os nematoides parasitas de plantas ou fitonematoides, conhecidos como vermes, são organismos microscópicos que parasitam, em sua maioria, o sistema radicular das plantas, sendo considerados um dos principais problemas da agricultura moderna, pois sua presença causa elevados danos econômicos além de elevado custo de manejo. Dentro do sistema de manejo contra os fitonematoides na agricultura existem, a rotação de culturas, e uso de nematicidas, sejam eles de origem química ou biológica. O controle biológico de nematoides parasitas de plantas é uma técnica que utiliza microrganismos com o intuito de reduzir o número populacional desses vermes. No Brasil existem 104 produtos registrados para manejo de nematoides, sendo desses 69 biológicos. (AGROFIT, 2024). Em solos naturais, não cultivados, as populações de nematoides encontram-se em equilíbrio, entretanto quando existe a interferência humana, como solos cultivados, e principalmente em monocultura, as populações de fitonematoides podem crescer de forma desequilibrada resultando em grandes problemas econômicos. Em ambientes equilibrados, a população de fitonematoides também tende a se manter em equilíbrio.

Controle biológico consiste em reduzir a população do nematoide pela ação de outro organismo vivo, ocorre naturalmente nos solos, ou pela manipulação do ambiente, como a introdução de organismos antagonistas. Os principais microrganismos utilizados no controle biológico de nematoides são bactérias e fungos. As bactérias do gênero *Bacillus* spp. estão presentes em 68% dos bionematicidas comerciais, entre produtos formulados apenas com esse gênero ou a mistura dele com outros microrganismos (AGROFIT, 2024). Já os fungos mais conhecidos são *Purpureocillium lilacinum*, *Pochonia chlamydosporia*, *Clonostachys rosea*, *Arthrobotrys* e *Trichoderma* sp. sendo 24,6% produtos registrados no Brasil (AGROFIT, 2024).

O mecanismo de ação difere um pouco entre os fungos e bactérias. No caso dos fungos, o nematoide é utilizado como fonte de nutrientes a esses microrganismos. Já as bactérias liberam substâncias que dificultam o desenvolvimento dos nematoides na rizosfera e também produzem enzimas que atuam contra os nematoides. Esses agentes de biocontrole agem em diferentes estágios do ciclo de vida dos fitonematoides, como, juvenis, adultos e até mesmo induzindo respostas nas plantas.

Os fungos empregados no controle biológico de fitonematoides, causadores de danos nas plantas, são inofensivos para o meio ambiente, já que são saprófitas, isso é, decompõem a matéria orgânica, além de serem considerados recicladores de nutrientes. O modo de ação dos fungos nematófagos está baseado em ações enzimáticas associadas a processo físico de captura (Figura 3), e/ou invasão. Parasitam ovos, predam juvenis, adultos ou cistos, podendo ainda produzir substâncias que são tóxicas aos nematoides.

Figura 3 - Fitonematoide preso, “enlaçado”, pela estrutura adaptativa de hifa (seta) do fungo *Arthrobotrys* exemplificado o mecanismo de ação do tipo predador

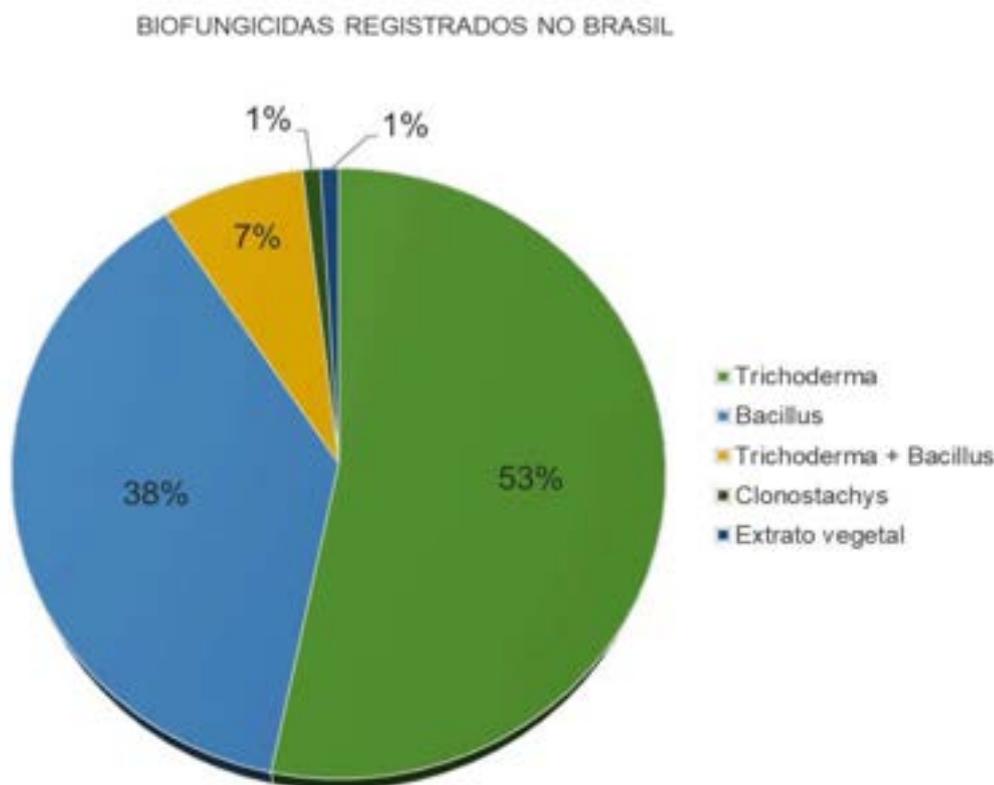


Fonte: Os Autores (2024).

Bactérias são capazes de produzir diferentes tipos de antibióticos e toxinas que causam danos aos fitonematoídeos interferindo no seu ciclo de vida. Bactérias do gênero *Bacillus* podem transformar exsudatos radiculares em subprodutos, que agem causando danos no processo de reconhecimento entre nematoídeos e plantas, produzindo metabólitos secundários que afetam o ciclo reprodutivo do nematoídeo.

Os biofungicidas também conhecidos como fungicidas microbiológicos são tecnologias no qual se utilizam microrganismos vivos ou subprodutos desses organismos para reduzir o inóculo ou doença causada por fungos fitopatógenos (AGRIOS, 2005). Frequentemente são utilizadas bactérias e fungos no controle de outros fungos. Segundo AGROFIT (2024), dentre o grupo das bactérias destacam-se as do gênero *Bacillus* e entre os fungos, os do gênero *Trichoderma* e mais recentemente a espécie *Clonostachys rosea* tendo um produto registrado no Brasil e um a base de extrato vegetal. Além disso, outro aspecto importante é que esses defensivos podem ser encontrados com formulação de cepas individuais ou combinadas entre fungo e bactéria (Figura 4).

Figura 4 - Gráfico das porcentagens de produtos biológicos registrados no Brasil com ação fungicida



Fonte: Os Autores (2024).

Dentro do grupo das bactérias destacam-se as espécies do gênero *Bacillus*, estando em maior número de produtos, as espécies *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. velezensis*. Os alvos dos biofungicidas a base de bactérias são os mais diversos, englobando patógenos que afetam tanto a parte aérea das plantas (*Sclerotinia sclerotiorum*; *Corynespora cassiicola*; *Ramularia spp*; *Cercospora spp*, *Phakopsora pachyrhizi* etc.) como aqueles que afetam o sistema vascular e causam podridões radiculares (*Fusarium spp*; *Rhizoctonia solani*; *Meloidogyne* etc.). Esses patógenos afetam culturas de importância econômica que vão desde hortifruti, grãos (soja, milho, feijão) e fibras (algodão).

Os mecanismos de biocontrole das bactérias consistem na competição (espaço, água, nutriente), formação de biofilme (colonização), antagonismo (lipopeptídeos, antibiótico e enzimas) (Figura 5) e indução de resistência sistêmica (Jamil *et al.*, 2017). Além dos diferentes mecanismos envolvidos no controle dos fitopatógenos, as bactérias possuem uma outra vantagem com relação ao operacional, sendo compatíveis em mistura com defensivos químicos como fungicidas, herbicidas e inseticidas, possibilitando o uso desde o tratamento de semente até pulverizações foliares.

Figura 5 - Bioensaio em placa de Petri evidenciando o antagonismo entre *Bacillus* sp. e *S. sclerotiorum*

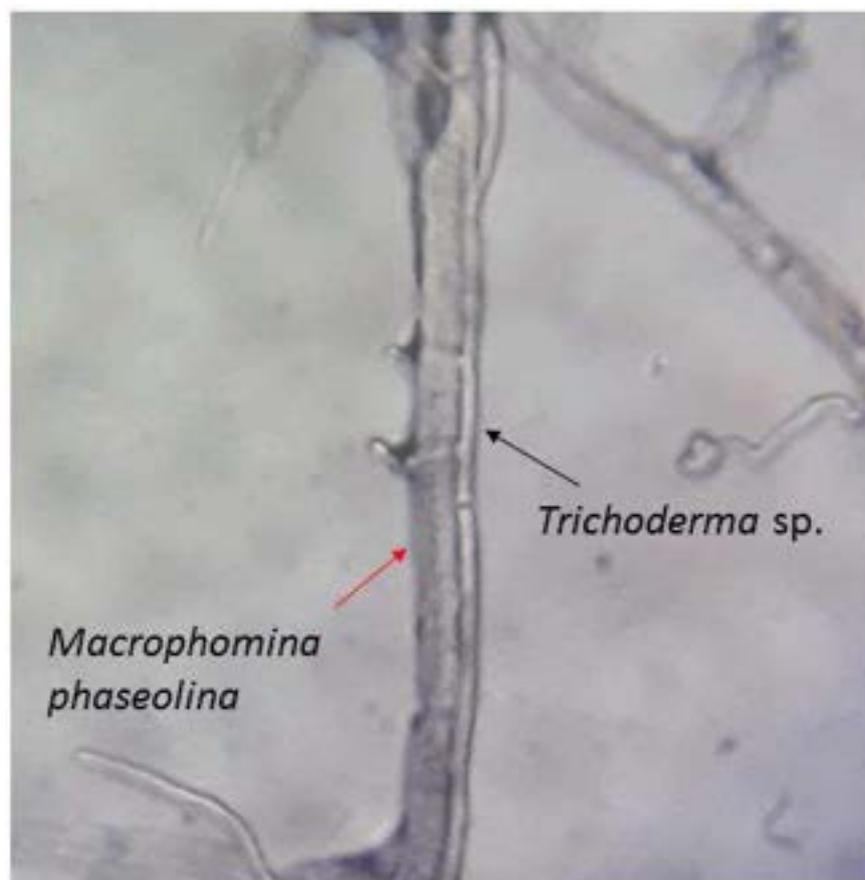


Fonte: Os Autores (2024).

As espécies do gênero *Trichoderma* têm demonstrado ação antagônica contra diferentes fitopatogênicos, possuindo, atualmente 65 biofungicidas como ingrediente ativo registrado no MAPA (AGROFIT, 2024) e os principais alvos são patógenos vinculados ao solo como, *Fusarium solani*, *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Thielaviopsis paradoxa*, *Macrophomina phaseolina*, *Phytophthora sojae*, *Pratylenchus zae*, *P. brachyurus*, *Meloidogyne incognita* e *Heterodera glycines*. Esses patógenos estão associados a fitopatologias em grandes culturas como, soja, milho, feijão, algodão, café, tomate entre outras.

Trichoderma se destaca entre os biofungicidas, pois possui diferentes mecanismos de ação que atuam diretamente sobre os fitopatógenos, causando a morte ou enfraquecimento dos mesmos através do micoparasitismo (Figura 6), competição (água, nutriente e espaço) e antibiose (enzimas e substâncias antimicrobianas), como também podem induzir a resistência sistêmica da planta. Além do efeito protetor nas plantas, as espécies de *Trichoderma* sp. também possuem a capacidade de promover o crescimento vegetal, contribuindo com melhor desenvolvimento radicular, absorção de água e nutrientes e incremento de produtividade.

Figura 6 - Hifa de *Macrophomina phaseolina* (seta vermelha) sendo parasitada por *Trichoderma* sp. (seta preta)



Fonte: Os Autores (2024).

Além do *Trichoderma*, recentemente um biofungicida foi registrado no MAPA a base do fungo *Clonostachys rosea*, tendo como alvo o patógeno de parte aérea, *Botrytis cinerea*, agente causal do Mofo-cinzento. Os mecanismos de ação desse agente de controle biológico se assemelham aos do *Trichoderma*, principalmente, com relação ao micoparasitismo e competição. Possivelmente no futuro possam surgir novos registros contendo o *C. rosea* como ingrediente ativo para diferentes alvos.

É também nesse ecossistema edáfico onde podemos encontrar algumas pragas que afetam as culturas do cerrado brasileiro, como corós, percevejo castanho, broca da raiz, lagarta elasmó, dentre outros. Sendo também possível utilizar os bioinseticidas no controle biológico. Essa é uma importante ferramenta biotecnológica para o manejo dos insetos pragas. Fungos, bactérias e nematoides entomopatogênicos são os principais grupos de bioinseticidas contra pragas do solo, microrganismos benéficos e presentes nesse ambiente, podem contribuir para o manejo além de ajudarem na recuperação e biodiversidade microbiana. Os fungos agem por contato e, uma vez que encontram a praga, aderem ao seu tegumento e iniciam o processo de infecção. A primeira etapa é a germinação do conídio, seguindo de formação de apressório, estrutura que permite a penetração de forma física, e produção enzimática (exemplo quitinase), penetração e multiplicação do fungo dentro do hospedeiro. Durante o processo de multiplicação

interna o fungo libera micotoxinas que irão causar a morte da praga. Após a morte, o fungo esporula externamente, dependendo das condições climáticas, e continua seu ciclo de vida podendo contaminar outros insetos pragas. Nematoides entomopatogênicos desempenham o papel de vetores ao transportar consigo espécies de bactérias, as quais são agentes patogênicos responsáveis por infectar os insetos. Ao serem introduzidas no interior da hemocele do inseto pelo nematoide, células das bactérias são liberadas na hemolinfa, onde excretam toxinas no inseto causando sua morte.

Em suma, os biodefensivos vem crescendo cada vez mais em números de registros e aplicabilidade, tornando-se uma realidade de uso entre produtores do cerrado brasileiro, onde, além de apresentarem bons resultados no controle de pragas e doenças, são eficientes na manutenção, recuperação e preservação dos solos nesse ecossistema de extrema importância para o Brasil.

8.3 Fungos micorrízicos arbusculares e sua importância para a sustentabilidade da agricultura no cerrado brasileiro

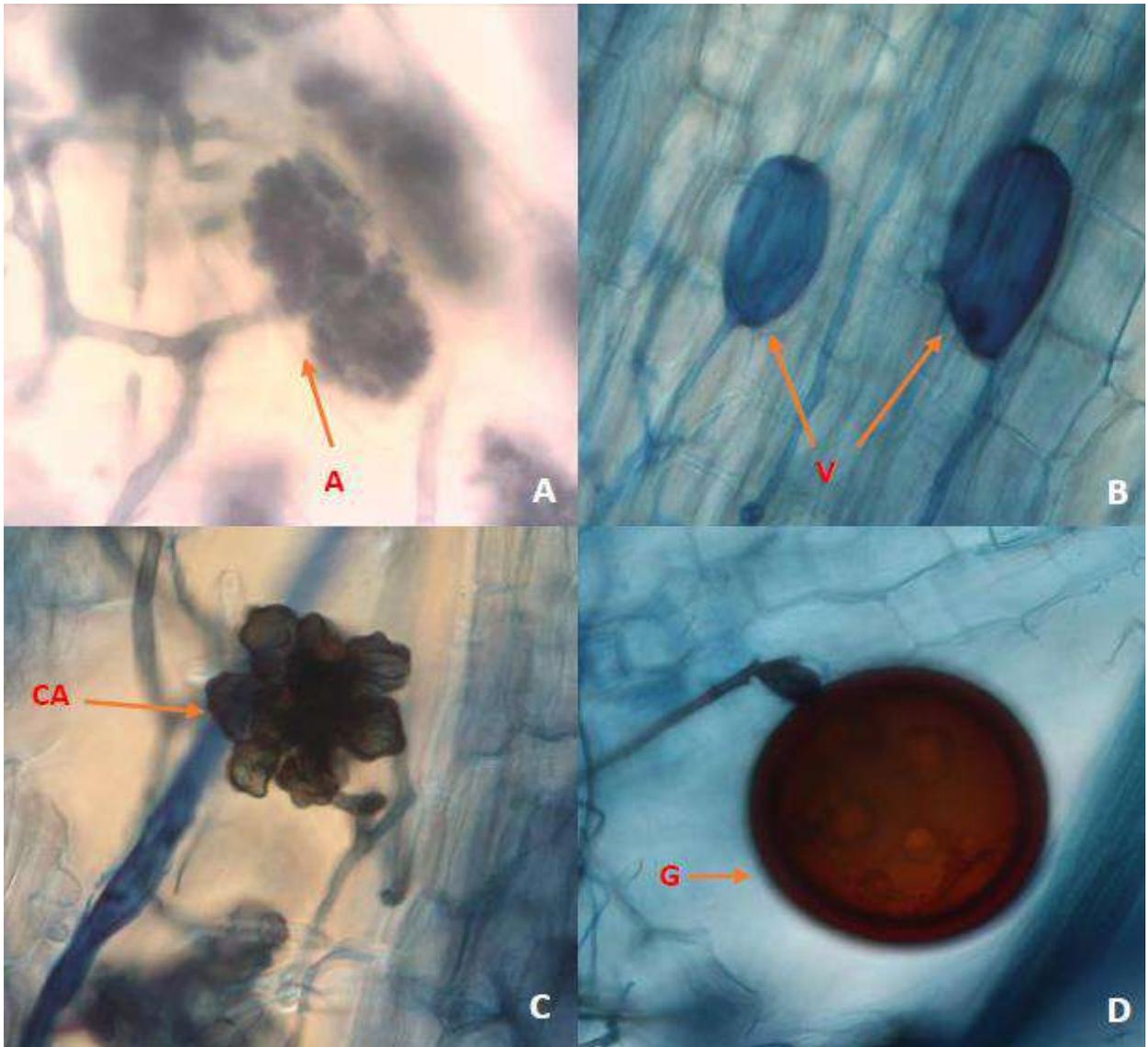
Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são um grupo específico de fungos do solo, pertencentes ao filo Glomeromycota, que formam associação simbiótica com as raízes de mais de 80% das espécies de plantas terrestres (Smith; Read, 2008), sendo cruciais para o surgimento e funcionamento dos ecossistemas globais. Nessa associação, as plantas fornecem carboidratos (até 20%) e lipídeos obtidos durante a fotossíntese (Parniske, 2008) e, em troca, os FMA transferem para os hospedeiros nutrientes, principalmente os de baixa mobilidade, como fósforo, absorvidos pelas hifas extra radiculares.

Dada a extensa trajetória evolutiva dos FMA e sua aparente falta de especificidade em relação ao hospedeiro, não surpreende que essa associação esteja presente em todos os ecossistemas terrestres. Isso inclui desde florestas tropicais e temperadas até dunas de areia, desertos, pastagens e agroecossistemas, configurando-se como a simbiose mais amplamente estabelecida entre fungos e plantas na natureza. Até o momento, foram descritas mais de 300 espécies de FMA, das quais 119 espécies já foram registradas para o Bioma Cerrado (Ponte, 2017), pertencentes a 26 gêneros, com destaque para *Acaulospora* e *Glomus*, e 11 famílias de FMA (Acaulosporaceae, Ambisporaceae, Archaeosporaceae, Dentiscutataceae, Diversisporaceae, Entrophosporaceae, Gigasporaceae, Glomeraceae, Paraglomeraceae, Racocetraceae e Scutellosporaceae), demonstrando a importância das áreas de Cerrado como reservatórios de diversidade de FMA.

A relação simbiótica entre os FMA e as plantas é caracterizada pela formação de estruturas intracelularmente nas raízes chamadas arbúsculos (Figura 7A), que constituem o sítio de troca entre a planta e o fungo. Em algumas espécies de FMA, estruturas chamadas vesículas (Figura 7B), localizadas nas raízes, armazenam lipídios e glicogênio. Por outro lado, alguns grupos de FMA não produzem vesículas, mas têm células auxiliares (Figura 7C) como estruturas de armazenamento fora das raízes. Os glomerosporos (Figura 7D) representam as principais estruturas reprodutivas, exercendo funções essenciais de resistência e propagação. Eles são formados principalmente no micélio externo, embora também possam surgir no interior das raízes do hospedeiro.

A capacidade do micélio externo em funcionar como uma conexão entre as raízes e os microambientes do solo circundante gera vários benefícios às plantas, melhorando principalmente o fornecimento de nutrientes. Por meio das vias micorrízicas, é possível transferir até 80% do fósforo e até 20% do nitrogênio para as plantas (Andrino *et al.*, 2021; Leigh *et al.*, 2009). Embora esses fungos tenham acesso às mesmas fontes de P que as plantas, eles exploram essas fontes de maneira mais eficiente por meio de suas hifas, que são suas estruturas extremamente longas e finas, com aproximadamente 2 µm de diâmetro. Essas estruturas fúngicas conseguem explorar microambientes inacessíveis às raízes ou aos pêlos radiculares (100–500 µm de diâmetro), estendendo-se para além da zona de depleção da raiz (Hodge, 2017).

Figura 7 - Estruturas características dos FMA: A - Arbúsculo, B - Vesícula, C - Células auxiliares e D - Glomerosporo



Fonte: Os Autores (2024).

Essa interação benéfica contribui não apenas para a nutrição das plantas, mas também para a resistência das plantas a estresses bióticos (ex. pragas e patógenos) e abióticos (ex. salinidade, seca, frio, estresse por metais pesados e deficiências de nutrientes), promovendo a adaptação e sobrevivência em diferentes condições. No âmbito agrícola, essa relação simbiótica revela um amplo potencial biotecnológico, visto que os efeitos positivos dessa simbiose se refletem em incrementos na produção de biomassa, maior produtividade das plantas hospedeiras, otimização do uso de fertilizantes fosfatados, maior tolerância a patógenos, além de acelerar o desenvolvimento, reduzindo o tempo de formação de mudas, e a taxa de sobrevivência de plantas micropropagadas ou não, quando levadas a campo.

Outro aspecto relevante da contribuição dos FMA é a estabilidade de agregados, melhoria na aeração do solo e subsequente disponibilidade de água, resultando em benefícios para o hospedeiro vegetal. Esses microrganismos do solo são considerados agregadores do solo devido ao efeito combinado das hifas extra radiculares e da secreção de glomalina pelas hifas. A glomalina é uma glicoproteína hidrofóbica, insolúvel e recalcitrante, desempenhando um papel importante na formação e estabilidade dos agregados do solo, armazenamento de carbono e melhorias na qualidade do solo, além de promover retenção de água e nutrientes. Os polissacarídeos da glomalina são pegajosos e mantêm agregados menores juntos. Um agregado estável pode reduzir a perda de carbono e atenuar a taxa de decomposição microbiana através de efeitos de revestimento e isolamento. Alguns estudos indicam que a combinação da glomalina com as hifas pode ser responsável por uma parcela significativa do total de carbono orgânico presente no solo, podendo contribuir com até 15% (Miller; Jastrow, 2000), contribuindo para compensar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), beneficiando a produtividade agrícola e mitigando o aumento da temperatura.

A fixação de carbono desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, sendo essencial para reduzir as concentrações de CO₂ na atmosfera. Processos como humificação, agregação e sedimentação são fundamentais para o sequestro de carbono, enquanto a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação contribuem para as perdas (Machado, 2005). No solo, a formação de agregados e a estabilização da matéria orgânica são importantes para o sequestro de carbono, prolongando seu tempo de permanência e prevenindo reemissões atmosféricas. Utilizar algumas estratégias, como o plantio direto, não apenas reduz a perturbação do solo, mas também estabelece condições propícias para a ação benéfica de microrganismos, desempenhando um papel crucial na formação de agregados essenciais para o sequestro de carbono.

Uma gestão sustentável do solo é essencial para a redução das mudanças climáticas, pois favorece o sequestro de carbono. Distúrbios no solo podem representar obstáculos ao estabelecimento da vegetação. Em meio a desafios ambientais, práticas sustentáveis do solo, incluindo plantio direto e a inoculação de microrganismos benéficos, emerge como um componente essencial para promover o sequestro de carbono e contribuir para a recuperação efetiva do solo. Dessa forma, os FMA desempenham um papel importante na fixação de carbono no solo, representando uma estratégia promissora para compensar as emissões de CO₂, além de proporcionar uma série de outros benefícios às plantas e ao ambiente. A compreensão e a promoção dessas interações simbióticas são essenciais para o manejo sustentável dos ecossistemas terrestres e para a mitigação das mudanças climáticas.

8.4 Considerações finais

A biodiversidade presente no solo é notável, abrigando uma vasta gama de microrganismos. Estes desempenham funções vitais para o sistema edáfico como, participação nos processos bioquímicos, degradando materiais orgânicos, fixando nitrogênio, entre outros. A microbiologia do solo desempenha um papel central na qualidade e sustentabilidade dos ecossistemas, especialmente no Cerrado brasileiro. A compreensão e aplicação efetiva dos princípios da microbiologia do solo são essenciais para promover práticas agrícolas sustentáveis, preservar a biodiversidade e assegurar a produtividade a longo prazo. O uso estratégico de biodefensivos e a promoção de interações benéficas entre microrganismos e plantas são elementos-chave para enfrentar os desafios presentes na agricultura do Cerrado e garantir sua sustentabilidade futura.

Referências

ANDREOTE, F. D.; CARDOSO, E. J. B. N. **Introdução a biologia do solo**. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (Orgs). Microbiologia do solo. Piracicaba: ESALQ, 2016. p. 9 - 22.

ANDRINO, A.; GUGGENBERGER, G.; SAUHEITL, L. *et al.* Carbon investment into mobilization of mineral and organic phosphorus by arbuscular mycorrhiza. **Biol. Fertility Soils**, 57, p. 47–64, 2021.

AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5.ed. Academic Press, 2005.

AGROFIT. **Sistemas de agrotóxicos fitossanitários**. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 20 fev. 2024.

BRASIL. **Instrução normativa SDA/MAPA nº 13 de 24 de março de 2011**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-13-de-24-03-2011-inoculantes.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v. 10, Safra 2022/23, n. 12, décimo segundo levantamento, setembro 2023.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Status of the World's Soil Resources: Main Report**. Rome, 2015. 648 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2024.

HODGE, A. Accessibility of Inorganic and Organic Nutrients for Mycorrhizas. In: JOHNSON N. C.; GEHRING, C.; JANSÁ, J. (Eds). **Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage**. Elsevier, Amsterdã, 2017. p 129–148.

JAMIL, S.; HUI TIAN; MINGSHAN J. I. Bacillus species as versatile weapons for plant pathogens: a review. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 31(3), 2017. p. 446-459.

LEIGH, J.; HODGE, A.; FITTER, A. H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. **New Phytol.** 2009;181(1):199-207. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02630.x. Epub 2008 Sep 22.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, 28(2), 2005. p. 329–34.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS, F. B; LOPES, A. A. C. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo.** 2018 circular 38.

MILLER, R. M.; JASTROW, J. D. **Mycorrhizal Fungi Influence Soil Structure.** In: Y. Kapulnik; D. D. Douds, Eds., *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*, Dordrecht: Kluwer Academic, 2000. p. 3-18.

PARNISKE M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nat Rev Microbiol.** 2008 Oct;6(10):763-75. doi: 10.1038/nrmicro1987.

PONTES, J.S. Diversidade de fungos micorrizicos arbusculares (FMA) em ecossistemas naturais e agrícolas do cerrado. **Tese (Doutorado)**, Centro de Biociências, Universidade Federal de Pernambuco, p.97. 2017.

PROCÓPIO, L.; BARRETO, C. The soil microbiomes of the Brazilian Cerrado. **Soil and Landscape Ecology**, 21, p. 2327-2342, 2021.

SMITH, S. E.; READ, D. J. Simbiose micorrízica. Imprensa Acadêmica Parniske M (2008) Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nat Rev Microbiol** 6, p. 763–775, 2008.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 416.

CAPÍTULO 9

MACROFAUNA DO SOLO E MINHOCAS EM SISTEMAS DE USO DO SOLO NO CERRADO

Marie Luise Carolina Bartz
Wilian Carlo Demetrio
Rafaela Tavares Dudas
Rodrigo Roani
George Gardner Brown

Resumo

A fauna edáfica ainda é uma das grandes fronteiras de conhecimento a ser explorado pela Ciência do Solo, uma vez que esta é responsável por uma infinidade de funções ecossistêmicas que afetam os processos químicos e físicos do solo e, conseqüentemente, nossos sistemas de produção agropecuária. A macrofauna do solo (organismos visíveis a olho nu) possui mais de 40 táxons que exercem funções como bioturbação, decomposição e predação que atuam sobre pragas e doenças. Este capítulo é um resumo de 63 estudos da macrofauna desenvolvidos no bioma Cerrado, abrangendo trabalhos sobre a fauna epiedáfica (26 estudos) amostrados por armadilhas de queda, a macrofauna do solo (36 estudos) e diversidade de espécies de minhocas (apenas dois estudos) avaliados pelo método de escavação e triagem manual de monolitos de solo. Os sistemas de uso do solo foram classificados com base em um gradiente de perturbação considerando o revolvimento do solo e diversidade de culturas, gerando assim um gradiente de intensidade de uso: culturas anuais > culturas perenes > pastagens > plantios florestais > vegetação nativa. Embora o número de trabalhos seja escasso, no geral, a maior riqueza da fauna epiedáfica e a maior abundância dos grupos da macrofauna foi observada em áreas de vegetação nativa, a qual possui maior número de áreas avaliadas. As culturas anuais apresentaram baixa abundância de minhocas quando comparadas às áreas de vegetação nativas. Até o momento, foram identificadas 84 espécies de minhocas ocorrendo na região do Cerrado, sendo 62 nativas e 22 exóticas. Informações sobre a biodiversidade dos grupos da macrofauna e o potencial de espécies novas de minhocas a serem encontradas neste bioma é bastante alto considerando as grandes áreas sem esforço amostral no bioma e a ausência de registros em vários estados.

9.1 Introdução

A fauna edáfica é um tema ainda pouco estudado na Ciência do Solo, especialmente quando comparada a outras áreas como a Química e Fertilidade, Manejo, Conservação e Física do solo (Feller *et al.*, 2003; Bottinelli *et al.*, 2015). No Brasil, poucos profissionais dentro das Ciências Agrárias têm a fauna do solo como objeto de pesquisa, sendo mais comum o estudo de alguns grupos específicos por zoólogos na Ecologia ou Entomologia. Em outros países, como Estados Unidos, França e Alemanha, a fauna do solo tem recebido maior atenção historicamente (Brown; Sautter, 2009), devido ao efeito destes invertebrados em diversas funções do solo, e sobre a provisão de uma ampla gama de serviços ecossistêmicos (Lavelle *et al.*, 2006), bem

como por sua utilidade como bioindicadores ambientais, devido à sua alta susceptibilidade à cobertura vegetal e às práticas de manejo do solo (Paoletti, 1999).

A fauna do solo pode ser classificada de diversas formas, sendo uma das mais utilizadas baseada no diâmetro corporal dos invertebrados (Swift *et al.*, 1979). Considerando essa classificação, temos a micro (< 0,1 mm), meso (0,1 a 2 mm) e a macrofauna (> 2 mm). A microfauna inclui animais microscópicos como os rotíferos, os tardígrados e os nematoides que vivem na solução do solo, entre as áreas gravitacional, capilar e higroscópica. Participam na decomposição da matéria orgânica, e atuam como importantes predadores de microorganismos, auxiliando na ciclagem de nutrientes, especialmente o nitrogênio. Já a mesofauna comporta principalmente microartrópodes como os ácaros, colêmbolos, apterigotas e pequenas larvas de insetos, além dos enquitreídeos, também conhecidos como microminhocas. Eles vivem nas cavidades do solo preenchidos com ar e formam microagregados (excrementos) que aumentam as interações das superfícies bioquímicas ativas do solo, além de serem predadores de organismos menores e participarem na transformação da matéria orgânica do solo (FAO *et al.*, 2020).

A macrofauna, por sua vez, é composta principalmente por organismos visíveis a olho nú, e inclui mais de 40 táxons diferentes. Estes animais agem como transformadores da liteira ou da palhada, predadores, herbívoros ou fitófagos, e engenheiros do ecossistema que se movem pelo solo, construindo estruturas (túneis, galerias ou câmaras) que afetam a permeabilidade da água, a aeração e criam novos habitat para os organismos menores. Suas fezes ou excrementos são foco de alta atividade e diversidade microbiana, e frequentemente concentram materiais orgânicos e nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas.

9.2 Contextualização

9.2.1 A macrofauna do solo e os serviços ecossistêmicos

Entre os principais grupos taxonômicos da macrofauna estão as minhocas, formigas, centopeias, baratas, aranhas, tesourinhas, cigarras, traças, larvas de mosca e mariposa, larvas e adultos de besouros, e cupins, piolhos de cobra, grilos, caracóis, escorpiões, percevejos e tatuzinhos. São organismos invertebrados que vivem acima do solo na liteira (serapilheira), ou dentro do solo por uma parte ou todo o ciclo de vida. Eles podem ser consumidores de solo (geófagos), partes vivas de plantas, raízes (fitófagos), matéria orgânica do solo, serapilheira, madeira (detritívoros) ou outros animais e fungos (predadores) (Brown *et al.*, 2015). Os animais mais ativos na superfície são as formigas, centopeias, baratas, aranhas, tesourinhas, traças, cupins, piolhos de cobra, caracóis, escorpiões, percevejos, besouros e tatuzinhos, que podem ser coletados facilmente com armadilhas de queda (pitfall traps), ou do tipo Provid (Antoniolli *et al.*, 2007). Já a macrofauna endogeica é aquela que vive mais tempo dentro do solo e raramente sobe à superfície, e inclui principalmente as minhocas, os cupins, as ninfas de cigarras e algumas larvas de besouro.

No geral, a macrofauna do solo desempenha várias funções essenciais para a saúde dos ecossistemas e o fornecimento de serviços ecossistêmicos importantes para a sobrevivência humana e dos outros seres vivos (Figura 1). Dentre as principais funções desempenhadas pela macrofauna podemos citar: a modificação (favorável ou desfavorável) do crescimento das plantas; a catálise da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), auxiliando na ciclagem

de nutrientes; o sequestro de carbono e as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera; a remoção de resíduos e contaminantes, como pesticidas, agindo como bioacumuladores destas substâncias, reduzindo sua toxicidade e disponibilidade no ambiente; a promoção da formação do solo (pedogênese) e da conservação da biodiversidade, modificando o solo e gerando novos habitats para outros organismos; a regulação da dispersão de sementes, pragas e doenças através de escavação e mistura do solo; a regulação da disponibilidade de água no solo, aumentando a infiltração e reduzindo a erosão do solo através da alteração na estrutura do solo; a fonte de produtos farmacêuticos e de alimentação para os seres humanos, animais de estimação e outros animais (Lavelle *et al.*, 2006; Brown, 2018). Portanto, é crucial garantir a conservação e manejo adequado desses organismos para proteger e sustentar os ecossistemas e sua funcionalidade.

Figura 1 - Grupos funcionais a que os diversos táxons da macrofauna do solo pertencem e suas respectivas funções e a quais serviços ecossistêmicos desempenham



Fonte: Bünemann *et al.* (2018).

Considerando os grupos mais representativos da macrofauna, a riqueza de espécies mundial representa cerca de um milhão de espécies, sendo que o Brasil abriga em torno de 10% desta biodiversidade (Tabela 1).

Entre os representantes da macrofauna, destacam-se os "engenheiros do ecossistema" (geófagos/bioturbadores) como os cupins, besouros escarabeídeos, formigas, milípeias e minhocas. Esses animais criam estruturas biogênicas como galerias, ninhos, câmaras e bolotas fecais, que modificam as propriedades físicas do solo e a disponibilidade de recursos para outros organismos (Lavelle *et al.*, 1997).

As formigas (Hymenoptera: Formicidae) e os cupins (Isoptera) são insetos sociais que vivem em colônias compostas por milhões de indivíduos. As formigas, particularmente diversificadas (existem em torno de 2750 espécies no Brasil), desempenham diversas funções ecológicas que, além de engenheiras do ecossistema, também podem ser cultivadoras de fungos, detritívoras, fitófagas e predadoras de outros organismos. Embora não ingerindo solo, as formigas transportam-no com suas mandíbulas na construção de ninhos, o que contribui para o

transporte ativo de matéria orgânica para o solo e a maior biodisponibilidade de certos nutrientes, como o fósforo.

Os cupins, por sua vez, incluem por volta de 290 espécies no Brasil, e se alimentam de material celulósico, acelerando a decomposição e reciclagem de nutrientes minerais contidos na matéria vegetal morta. Eles são capazes de construir extensas redes de ninhos e túneis tanto no interior como na superfície e acima do solo, movimentando uma grande quantidade de partículas, afetando a formação de agregados. Essa atividade pode aumentar a porosidade, aeração, infiltração e drenagem do solo. Além disso, os cupins possuem simbiose com protozoários e bactérias fixadoras de nitrogênio, o que compensa a alta relação C/N em sua dieta. Embora as formigas e os cupins sejam insetos bem estudados em termos biológicos, comportamentais e taxonômicos, ainda existem importantes questões que precisam ser esclarecidas sobre seus efeitos no solo e suas propriedades.

Os besouros (Coleoptera) por sua vez, possuem a maior riqueza de espécies de todos os animais, havendo mais de 350 mil espécies desse inseto no planeta. Essa ampla diversidade lhes permitiu ocupar diversos nichos e funções, tornando este um dos poucos grupos que possuem espécies em todos os grupos funcionais (geófagos/bioturbadores, detritívoros/decompositores, fitófagos/pragas e predadores/parasitas). Desempenham, portanto, várias funções ecológicas importantes, como a ciclagem de nutrientes, a bioturbação do solo, o crescimento de plantas, a dispersão de sementes e a regulação trófica. As espécies de coleópteros possuem hábitos alimentares variados, incluindo a predação de minhocas, diplópodes, formigas e caramujos, além de se alimentarem de carcaças, frutos em decomposição, fungos, serapilheira, matéria orgânica e solo. Eles também contribuem para o aumento do teor de matéria orgânica no solo, escavando galerias e câmaras, auxiliando na dispersão de sementes.

As minhocas estão entre os organismos do solo mais significativos e são considerados indicadores globais da saúde do solo, especialmente entre os agricultores (Schiedeck *et al.*, 2009). As estruturas biogênicas destes animais impactam nas funções do solo: os túneis e as galerias influenciam as trocas gasosas no solo e a permeabilidade da água, enquanto os excrementos ou coprólitos concentram nutrientes, matéria orgânica e atividade microbiana. Desta forma, estas estruturas afetam diretamente o crescimento das plantas, assim como a atividade e populações de outros organismos no solo. Atualmente há 5.738 espécies de minhocas no mundo (Brown *et al.*, 2024) e no Brasil se conhecem 306 espécies, apesar de haver um grande número de espécies ainda por descrever. Das conhecidas, aproximadamente 20% são espécies exóticas/invasoras/peregrinas e 80% são nativas (Brown *et al.*, 2013).

Tabela 1 - Grupos representantes da macrofauna do solo, número descrito ou estimado da diversidade específica mundial e no Brasil, e suas diversas funções ecológicas

Classe/Ordem (nome comum)	Espécies descritas no		Grupo funcional			
	mundo	Brasil	Geófago/ Bioturbador	Detritívoro/ Decompositor	Fitófago/ Praga	Predador/ Parasita
Araneae (aranhas)	49530 ^a	3145 ^a			X	X
Archaeognata (traças)	548 ^a	25 ^a		X	X	
Blattaria (baratas)	4834 ^a	714 ^a		X	X	
Chilopoda (centopeias)	2500 ^a	150 ^a	X			X
Coleoptera (besouros)	389487 ^{a,b,c}	33332 ^{a,b,c}	X	X	X	X
Crassiclitellata (minhocas)	5738 ^a	306 ^a	X	X		
Dermaptera (tesourinhas)	1933 ^a	134 ^a		X	X	X
Diplopoda (milipeias, piolhos de cobra, gongolos)	10000 ^a	300 ^a	X	X	X	
Gastropoda (caracóis e caramujos)	30000 ^a	651 ^a	X	X	X	
Hemiptera (percevejos e cigarras)	67409 ^a	6513 ^a		X	X	X
Hirudinea (sanguessugas)	92 ^a	47 ^{ab}				X
Hymenoptera: Formicidae (formigas)	16503 ^a	1378 ^a		X	X	X
Isopoda (tatuzinhos)	4250 ^a	135 ^a		X	X	
Isoptera (cupins)	2929 ^a	344 ^a		X	X	
Ixodida (carrapatos e micuins)	742 ^a	67 ^a				X
Mantodea (louva-deuses)	2494 ^a	253 ^a				X
Neuroptera (formiga-feão, bicho-lixeiro)	2338 ^a	249 ^a				X
Onychophora (oniscóforos)	208 ^a	22 ^a				X
Opiliones (opiliões)	6637 ^a	951 ^a				X
Orthoptera (grilos, paquinhãs, tripes)	17568 ^a	1281 ^a		X	X	
Pseudoscorpionida (pseudo-escorpiões)	3700 ^a	174 ^a		X		X
Solifugae (aranha-camelo)	1113 ^a	8 ^a				X
Thelyphonida (escorpião-vinagre)	111 ^a	11 ^a				X
Scorpionida (escorpiões)	>2200 ^a	160 ^a				X
Zygeontoma (traças)	594 ^a	32 ^a		X	X	X
Total da fauna do solo	623458^{a,b,c}	50382^{a,b,c}				

^a O número de espécies indicado inclui aquelas que vivem tanto dentro do solo quanto na serapilheira e habitats acima do solo.

^b O número inclui tanto as espécies terrestres quanto as aquáticas.

^c O número inclui as espécies de todas as famílias.

Fonte: Adaptado de Brown *et al.*, 2015.

9.2.2 Macrofauna do solo e minhocas no Cerrado - estado da arte

A macrofauna edáfica pode ser coletada usando diversos métodos, mas dois dos mais comuns são as armadilhas de queda, e a coleta manual ativa. As armadilhas de queda, também conhecidas por seu nome em inglês *pitfall traps*, representam um método semi-quantitativo, que avalia a atividade e diversidade dos organismos epiedáficos, ou seja, aqueles ativos ou que vivem na superfície do solo (Aquino et al., 2006). Já a catação manual da macrofauna edáfica, é comumente feita a partir de monólitos de solo, usando o amplamente conhecido método do TSBF, sigla usada para o *Tropical Soil Biology and Fertility Programme* em inglês, um órgão já extinto da UNESCO estabeleceu a padronização de diversos métodos para a avaliação da qualidade de solos tropicais (Anderson; Ingram, 1993). Mais recentemente, o método do TSBF foi também adotado pela ISO/CD 23611-5 (ISO, 2012), e uma descrição mais detalhada com chave de identificação dos principais táxons da macrofauna se encontram num manual publicado pela FAO (Ruiz et al., 2008). Possivelmente, este seja o método mais utilizado internacionalmente para avaliar as comunidades da macrofauna do solo no mundo (Brown et al., 2024), além de ser também muito usado para quantificar as populações de minhocas (Nadolny et al., 2020). Neste trabalho, portanto, apresentamos os principais resultados obtidos para a macrofauna epiedáfica, a macrofauna edáfica e as minhocas em diversos sistemas de uso do solo (culturas anuais, culturas perenes, pastagens, sistemas integrados, plantios florestais e vegetação nativa) no bioma Cerrado, usando esses dois métodos de amostragem.

Realizou-se a síntese de 63 estudos feitos com a fauna epiedáfica, macrofauna do solo e minhocas, e a localização das áreas avaliadas para cada grupo se encontra na Figura 2. Para a fauna epiedáfica (utilizando armadilhas de queda), foram encontrados 26 estudos (bolinhas verdes), enquanto para a macrofauna do solo (bolinhas pretas), foram compilados 36 estudos publicados e para as minhocas foi encontrado apenas um trabalho na literatura (Caballero, 1973). Há conhecimento da existência de outros trabalhos já realizados, porém esses dados ainda não foram publicados pelos autores. De qualquer modo, claramente grande parte do Cerrado ainda não possui sequer informação sobre a macrofauna do solo, evidenciando a necessidade de maiores esforços de coleta e pesquisa. Quando se considera apenas o registro de espécies de minhocas no Cerrado, a compilação foi realizada a partir de 46 trabalhos publicados, além de exemplares registrados nos livros tombo das coleções do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo (MZUSP) e da Embrapa Florestas (Coleção de Oligoquetas Fritz Müller - COFM), e estas informações estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Figura 2 - Distribuição das áreas com amostragem da macrofauna epi-edáfica usando armadilhas tipo *pitfall*, e da macrofauna edáfica e de minhocas usando triagem manual de monólitos de solo do Cerrado brasileiro



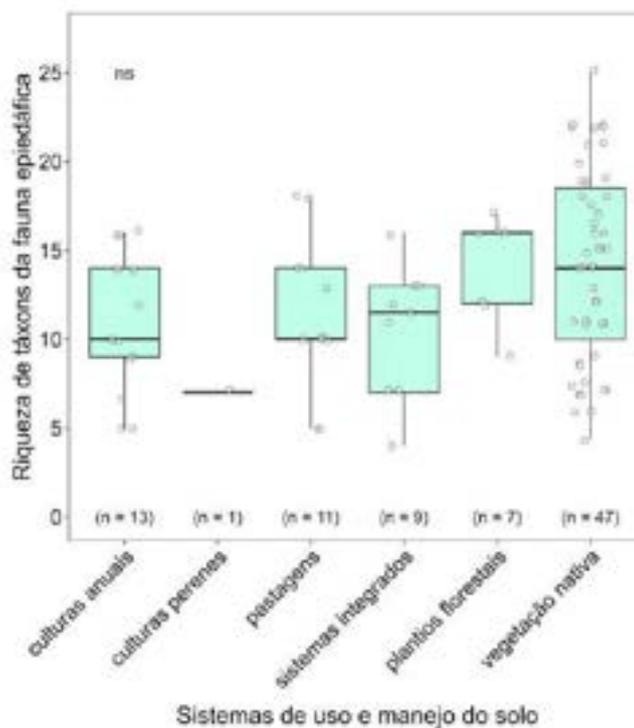
Fonte: Os Autores (2024).

a. Fauna epiedáfica

A macrofauna epiedáfica foi avaliada em 88 locais em sete estados brasileiros, e particularmente em vegetação nativa (47 locais). Os sistemas de uso antrópico, representaram menos de um terço das áreas avaliadas, e os grupos mais representativos nesses sistemas foram: Araneae, Blattaria, Coleoptera, Dermaptera, Diplopoda, Formicidae, Hemiptera, Isopoda, Isoptera e Orthoptera.

A riqueza média de grupos taxonômicos encontrados nos diferentes sistemas de uso não diferiu significativamente (Figura 3), porém alguns grupos foram encontrados majoritariamente em vegetação nativa e nas pastagens (Araneae, Coleoptera, Dermaptera, Formicidae, Hemiptera, Isopoda e Isoptera), e nesses sistemas encontrou-se o maior número absoluto de táxons (25 em vegetação nativa e 18 em pastagens). A média de táxons encontrados em vegetação nativa foi de 14,2 grupos taxonômicos e nas pastagens de 11,5 grupos taxonômicos, enquanto nas culturas anuais, nos sistemas integrados e nas culturas perenes foi de 11, 10,5 e sete grupos, respectivamente.

Figura 3 - Riqueza de táxons da macrofauna epiedáfica do solo em sistemas de uso do solo no Cerrado brasileiro em 26 estudos (*ns* indica que não existem diferenças significativas entre os sistemas de uso pelo teste de Kruskal-Wallis e *n* indicam o número de locais amostrados)



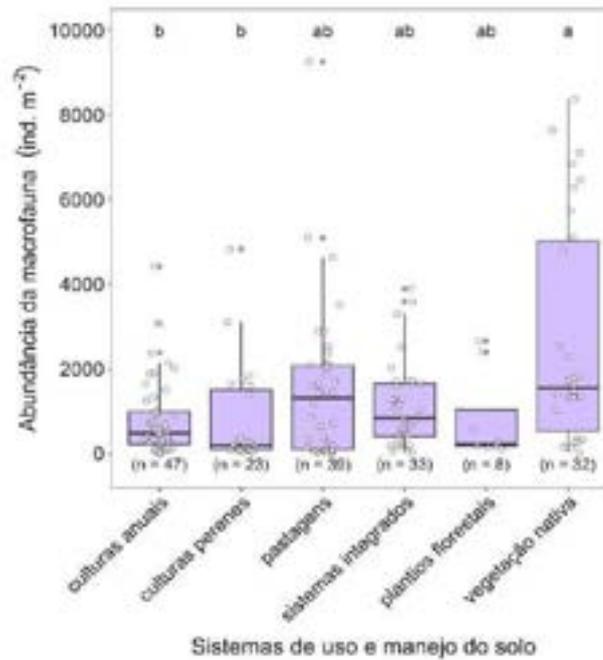
Fonte: Os Autores (2024).

b. Macrofauna do solo

As comunidades da macrofauna do solo no Cerrado foram avaliadas em 182 locais em 8 estados, sendo as culturais anuais o sistema mais estudado (47 locais), enquanto os plantios florestais representaram apenas oito locais, respectivamente. A abundância total dos organismos variou entre 799 e 809 indivíduos por metro quadrado em áreas de culturas perenes e anuais, e alcançando 4.315 indivíduos por metro quadrado em vegetação nativa, indicando que o uso intensivo do solo reduz consideravelmente as populações da macrofauna edáfica. Os grupos taxonômicos com maior número de indivíduos foram Crassieclitellata, Coleoptera, Chilopoda, Diplopoda, Formicidae e Isoptera (Figura 4).

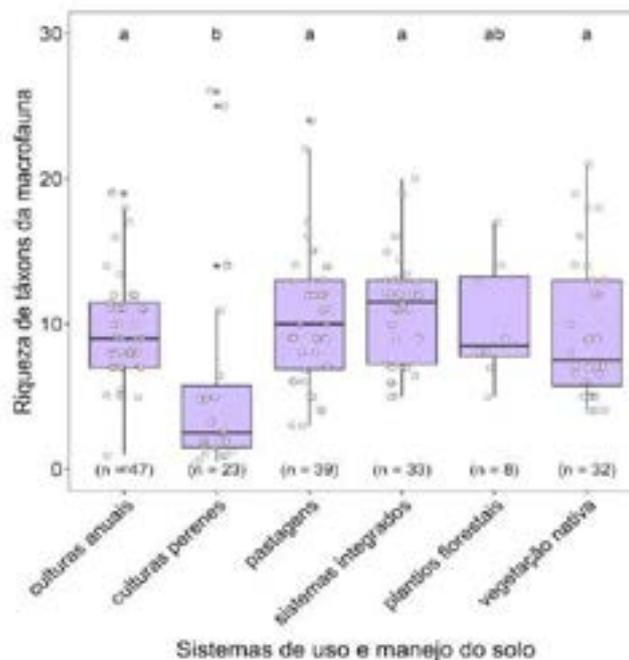
A riqueza média (Figura 5) de grupos variou entre seis e 11 táxons, sendo significativamente menor nas culturas perenes que nas culturas anuais, na vegetação nativa, nas pastagens e nos sistemas integrados (respectivamente 9,7, 9,5, 10,4 e 11,0 grupos). Entretanto, vale ressaltar que os plantios florestais tiveram um baixo esforço amostral.

Figura 4 - Abundância média da macrofauna do solo (indivíduos por metro quadrado) em diferentes sistemas de uso do solo no Cerrado brasileiro em 36 estudos (as letras minúsculas indicam que existem diferenças significativas entre os sistemas de uso pelo teste de Kruskal-Wallis e *n* indicam o número de locais amostrados)



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 5 - Riqueza média de táxons da macrofauna do solo em sistemas de uso do solo no Cerrado brasileiro em 36 estudos (as letras minúsculas indicam que existem diferenças significativas entre os sistemas de uso pelo teste de Kruskal-Wallis e *n* indica o número de locais amostrados)

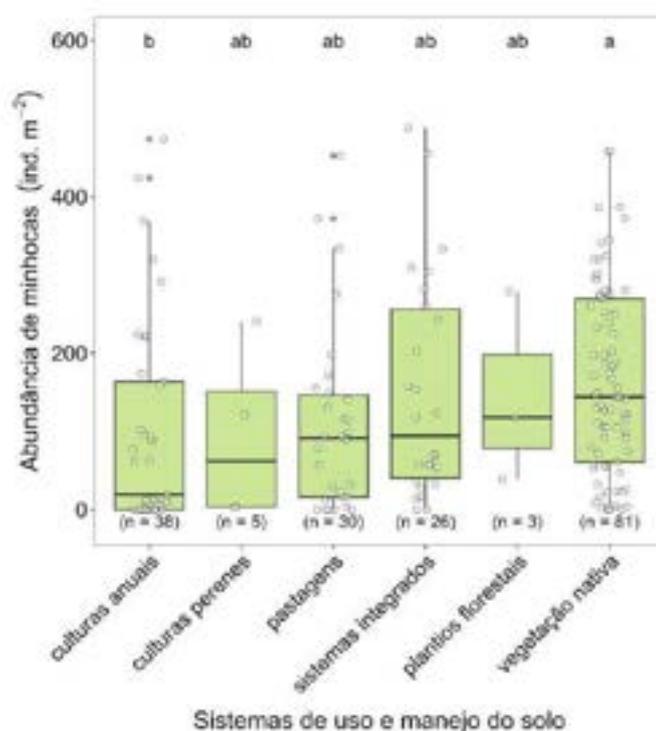


Fonte: Os Autores (2024).

c. Populações de minhocas

A abundância média das minhocas variou entre os sistemas de uso do solo, onde a vegetação nativa predominou, com 81 locais, seguindo das culturas anuais (38) e as pastagens (30). A maior população desses organismos foi observada em culturas perenes (227 indivíduos) por metro quadrado, enquanto as mais baixas populações foram encontradas em culturas anuais com 125 indivíduos por metro quadrado (Figura 6). Vale destacar novamente a grande variabilidade dos dados e, que para cultura perene existem informações apenas para 5 áreas. Assim como para os plantios florestais, houve apenas 3 áreas com informações disponíveis.

Figura 6 - Abundância de minhocas em sistemas de uso do solo no Cerrado brasileiro em 25 estudos (as letras minúsculas indicam que existem diferenças significativas entre os sistemas de uso pelo teste de Kruskal-Wallis e *n* indicam o número de locais amostrados)

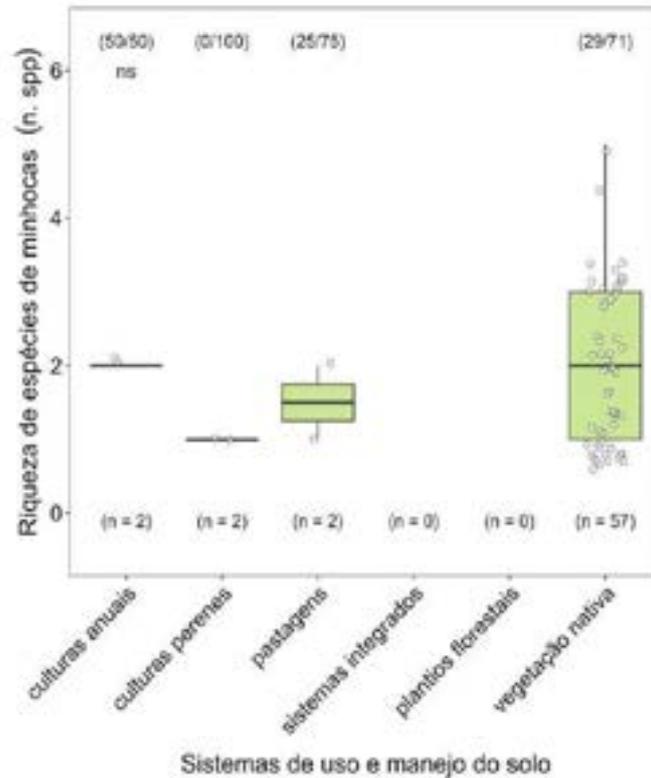


Fonte: Os Autores (2024).

A alta variabilidade na abundância também foi observada na riqueza total de espécies de minhocas (Figura 7). O total de espécies coletadas em cada sistema variou entre 1 e 2 espécies, onde os sistemas de uso do solo com menor riqueza foram as culturas perene (1 sp.) e pastagens (1,5 spp.), enquanto a maior riqueza foi observada em vegetação nativa e nas culturas anuais (1,9 e 2,0 spp., respectivamente). Vale ressaltar que não há informações disponíveis de riqueza de espécies para os sistemas integrados e os plantios florestais. Baseado na riqueza total de cada sistema de uso do solo calculamos a proporção de espécies nativas e exóticas (indicado na parte superior do gráfico). Houve predominância de espécies exóticas em todos os sistemas de uso do solo, chegando a representar de 50% até 100% da população de minhocas em culturas anuais e em culturas perenes, respectivamente. As espécies exóticas de minhocas foram

introduzidas com a ocupação humana nas regiões e são espécies capazes de suportar as mudanças que ocorrem no solo quando são adotados sistemas de produção. Ou seja, a menor proporção de espécies nativas foi observada em culturas perenes (0%), sem nenhuma espécie nativa e a cultura anual com a maior proporção (50%) de espécies nativas.

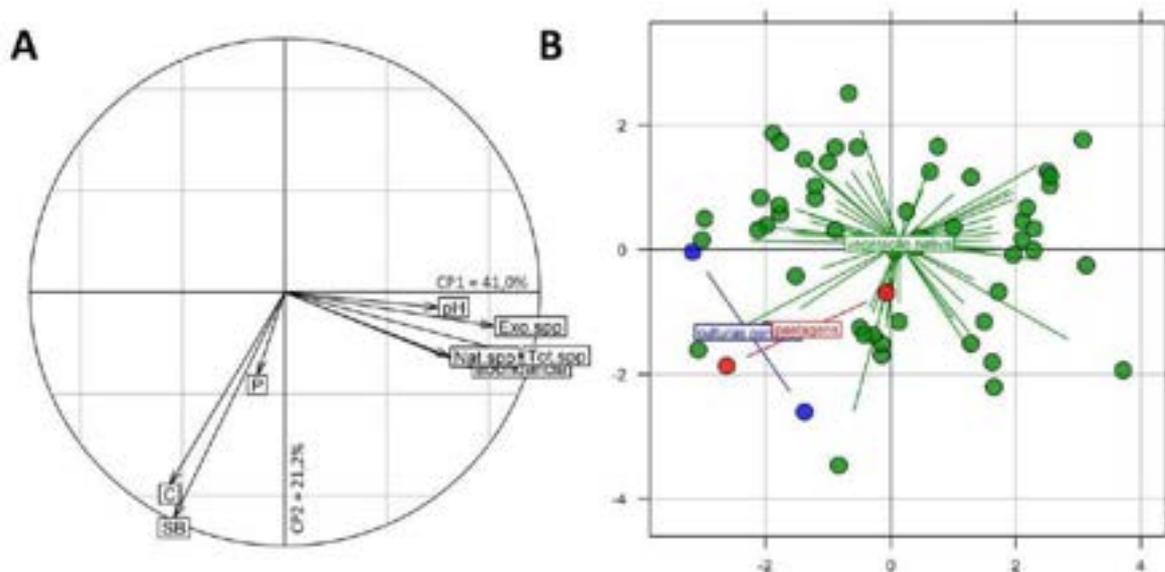
Figura 7 - Riqueza total de espécies de minhocas e proporção de espécies nativas e exóticas em sistemas de uso do solo no Cerrado brasileiro em dois estudos (valores no topo da figura indicam a proporção de espécies nativas e exóticas, *ns* indica que não existem diferenças significativas entre os sistemas de uso pelo teste de Kruskal-Wallis e *n* indicam o número de locais amostrados)



Fonte: Os Autores (2024).

Pouquíssimos estudos identificaram populações de minhocas, apenas um no bioma Cerrado, no nordeste de São Paulo que inclui a abundância e as espécies encontradas, que também possui informações para alguns atributos do solo (Caballero, 1973). A Figura 8 apresenta uma Análise de Componentes Principais que correlacionam as populações de minhocas (abundância de minhocas, número total de espécies, número de espécies nativas e número de exóticas) e atributos do solo (pH do solo, soma de bases, fósforo e carbono orgânico) nos sistemas de uso avaliados (vegetação nativa, pastagens e culturas perenes). Os atributos do solo carbono orgânico, fósforo e soma de bases se correlacionam com as áreas de culturas perenes e pastagens e devido ao manejo realizado nestas áreas (correções de acidez do solo e/ou fertilizações). Já a abundância, riqueza total, número de espécies nativas e o número de espécies exóticas junto com os valores mais elevados de pH estão correlacionadas com o maior número de áreas em vegetação nativa.

Figura 8 - Análise de componentes principais da abundância de minhocas (abundância), número total de espécies (Tot.spp), número de espécies nativas (Nat.spp), número de exóticas (Exo.spp), pH do solo (pH), soma de bases (SB), fósforo (P) e carbono orgânico (C) em relação aos sistemas de uso do solo no Cerrado (dados de Caballero, 1973)



*(vegetação nativa n= 52, culturas perenes n= 3, pastagens n= 2; $p \leq 0,05$).

Fonte: Os Autores (2024).

Enquanto à riqueza de minhocas no Cerrado, até o momento foram encontradas 84 espécies no total, pertencentes à oito famílias (Almidae, Benhamiidae, Eudrilidae, Glossoscolecidae, Lumbricidae, Megascolecidae, Ocnerodrilidae e Rhinodrilidae) (Tabelas 2 e 3). Dessas, 62 são nativas (Tabela 2), pertencentes maioritariamente às famílias Rhinodrilidae (28 spp.), Glossoscolecidae (20 spp.), e Ocnerodrilidae (9 spp.). Do total de 22 espécies exóticas (Tabela 3), a maior parte pertence ao gênero *Dichogaster* na família Benhamiidae (6 spp.) e a diversos gêneros nas famílias Ocnerodrilidae (5 spp.), e Megascolecidae (7 spp.). A espécie com distribuição mais ampla foi a minhoca *Pontoscolex corethrurus*, que há mais de 150 anos foi considerada por Müller (1857) como uma das mais comuns no nosso país (Brown; James, 2007).

É importante considerar que das espécies nativas, 11 são minhocuçus (indivíduos que alcançam mais de 20 cm de comprimento; Righi, 1999), e vários deles são frequentemente coletados e usados como isca para pesca. Por exemplo, o minhocuçú do Cerrado (*Rhinodrilus alatus*, Figura 9) é coletado e amplamente comercializado há mais de 7 décadas na região de Paraopeba (Drumond *et al.*, 2015). Apesar de existir um plano de manejo para a espécie não ser sobre-coletada, há registros de danos ambientais realizados na coleta de outras espécies (Silva, 2016; Brown; James, 2007), cujos impactos precisam ser melhor avaliados, para garantir a preservação ambiental e das populações das espécies em questão.

Figura 9 - Vendedores de minhocoçus *Rhinodrilus alatus* mostrando exemplares coletados (à esquerda), M.L.C. Bartz com um exemplar nas mãos (centro) e as placas do “shopping” (à direita) das minhocas na margem da BR040 entre Paraopeba e Caetanópolis em Minas Gerais.



Fonte: Bartz (2014).

Os estados com o maior número de espécies conhecidas foram São Paulo (32 espécies, sendo 18 nativas e 14 exóticas), Mato Grosso (25 espécies, sendo 14 nativas e 11 exóticas) e o Distrito Federal (23 espécies). São Paulo possivelmente seja o estado com o Cerrado melhor amostrado no país (Caballero, 1973; James; Brown, 2006), apesar dos esforços recentes no DF (Ferreira *et al.*, 2023). Contudo, o número de espécies novas encontradas no bioma ainda é bastante alto, e certamente se encontrarão muito mais com um maior esforço de coleta (Ferreira *et al.*, 2023). Os grandes espaços vazios de coleta no bioma, e a ausência de registros em estados como a Bahia e Piauí com importantes taxas de desmatamento recente são preocupantes, considerando o alto endemismo e susceptibilidade de muitas espécies nativas a mudanças no uso do solo (Lavelle; Lapied, 2003; Brown *et al.*, 2013). Muitas espécies são encontradas em áreas de veredas ou próximo a cursos d'água (Tabelas 2 e 3), áreas que vêm sofrendo pressões antrópicas como o assoreamento por erosão, o uso urbano ou para a agricultura, geração de energia ou por contaminação industrial ou resíduos de agrotóxicos.

Tabela 2 - Espécies de minhocas nativas ao Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocuçú estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
Almidae		
<i>Drilocrius iheringi</i>	Franca, Mirassol, Neves Paulista, Piracicaba, São José do Rio Preto, Tanabi, SP	Margem de rio, brejo
<i>Drilocrius</i> sp.	Iaras, SP	Brejo
Almidae sp.	Barra do Bugres, MT	Floresta alagável
Almidae sp.	Miranda, Ponta Porã, MS	Margem de rio, arroz inundado
Benhamiidae		
<i>Omodeoscolex divergens itapeçu</i>	Chapada dos Guimarães, MT	Capoeira, tronco podre
Glossoscolecidae		
<i>Enantiodrilus borellii</i>	Conquista d'Oeste, Comodoro (Nova Alvorada), MT	Floresta, área alagada, gramíneas
<i>Fimoscolex</i> sp.	Ponta Porã, MS	Sistema integrado
<i>Fimoscolex</i> sp.	Rio Claro, SP	Pastagem
<i>Fimoscolex</i> n.sp.	São Carlos, SP	Pastagem
<i>Glossodrilus</i> sp.	Planaltina (Embrapa)	Lavoura perene, sistema agroflorestal, mata de galeria, Margem de riacho
<i>Glossoscolex bondari</i>	Sidrolândia, MS; Rio Claro, Piracicaba, SP	Margem de rio
<i>Glossoscolex corderoi</i> *	Botucatu, Buri, São Manuel, SP	Margem de rio, brejo
<i>Glossoscolex grecoi</i>	Santa Rita do Passa Quatro (PE Vassununga), SP	Margem de rio, Floresta
<i>Glossoscolex ibirai</i> *	Ibirá, SP	Cerrado
<i>Glossoscolex matogrossensis</i> *	Dourados, Maracaju, Sidrolândia, MS	Margem de rio, margem de brejo
<i>Glossoscolex paulistus</i> *	Piracicaba, Rio Claro, SP	Pastagem, floresta, citricos
<i>Glossoscolex santarosaensis</i>	Rio Claro, SP	Pastagem
<i>Glossoscolex tocape</i>	Ribeirão Preto, SP	ND
<i>Glossoscolex uruguayensis</i> *	Campina do Monte Alegre, SP	Beira de rio
<i>Glossoscolex vizottoi</i> *	Bálsamo, Cedral, Fernandópolis, Meridiano, Mirassol, Monte Aprazível, Santo Anastácio, São José do Rio Preto, Uchôa, Votuporanga, SP; Dourados, MS	Cerrado, margem de rio, pastagem

Continua

Continuação Tabela 2 - Espécies de minhocas nativas ao Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocueçu estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
<i>Glossoscolex</i> n. sp.	São Carlos, SP	Sistema integrado
<i>Goiascolex cabrelli</i>	Porangatu, GO; Paraíso do Tocantins, TO	ND
<i>Goiascolex pepus</i>	Cocalinho (Cajaíba), Conquista d'Oeste, Comodoro (Nova Alvorada), MT	Gramíneas
<i>Goiascolex vanzolinii</i>	Barra do Bugres, MT	Cerrado
<i>Rhithodrilus</i> sp.	Planaltina (Embrapa)	Sistema integrado
Ocerodrilidae		
<i>Belladrilus pocaju</i>	Maracaju, Terenos, MS	Margem de rio, brejo, gramíneas
<i>Brunodrilus angeloi</i>	Santana do Riacho (Serra do Cipó), MG	Gramíneas beira de lagoa
<i>Eukerria barrigosi</i>	Miranda, MS	Arroz irrigado
<i>Eukerria cuca</i>	Cuiabá, MT	Margem de rio
<i>Eukerria emete</i>	Conquista d'Oeste, Comodoro (Nova Alvorada), MT	Área alagada, gramíneas
<i>Eukerria hortensis</i>	Cuiabá, MT	ND
<i>Eukerria urna</i>	Cuiabá, MT	ND
<i>Haplodrilus iheringi</i>	Piracicaba, SP	Beira de rio
<i>Liodrilus mendesi</i>	Caxias, MA	Cerrado
Rhinodrilidae		
<i>Andiorrhinus bucki</i>	Bataguáçu, MS	área alagável, sob cupinzeiro
<i>Andiorrhinus duseni</i> *	Itaberá, Itapeva, Buri, SP	Margem de rio, Cerradão
<i>Andiorrhinus karinae</i>	Primavera do Leste, Campo Verde, MT	vereda, cultura anual
<i>Andiorrhinus</i> n.sp.	Primavera do Leste, MT	Pastagem, Cerrado
<i>Andiorrhinus</i> n. sp.	Planaltina (Embrapa), DF	Cerradão
<i>Anteoides</i> sp.	Rio Brilhante, MS	Arroz irrigado
<i>Onychochaeta serieia</i>	Porangatu, GO; Paraíso do Tocantins, TO	ND
<i>Opisthodrilus borellii borellii</i>	Sidrolândia, Miranda, Bela Vista, MS; Cuiabá, Barra do Bugres, MT	Pastagem, horta, solo alagável
<i>Rhinodrilus alatus</i> *	Sete Lagoas, Paraopeba, Curvelo, Caetanópolis, Três Marias, Prudente de Moraes, Lassance, Maravilhas, Papagaios, Baldim, Pompéu, Araçai, Cordisburgo, Felixlândia, Morro da Garça, Corinto, Pirapora, MG	Cerrado, pastagem, plantio <i>Eucalyptus</i> , Cerradão

Continua

Continuação Tabela 2 - Espécies de minhocas nativas ao Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocuçu estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
<i>Rhinodrilus evandroi</i> *	Brasília (PN e JB de Brasília)	Cerrado, vereda
<i>Rhinodrilus garbei</i> *	Pirapora, MG; Botucatu, SP	ND
<i>Rhinodrilus hoeftingae</i>	Cactanópolis, Cachoeira da Prata, MG	Cerrado
<i>Rhinodrilus jucundus</i>	Paraiso do Tocantins, TO	ND
<i>Rhinodrilus motuçu</i> *	Porangatu, Uruaçu, GO; Cuiabá, MT	Margem de rio, Cerrado
<i>Rhinodrilus mortis</i> *	Campo Verde (São José da Serra)	Gramíneas, área alagável
<i>Rhinodrilus panxin</i>	Porangatu, GO	ND
<i>Rhinodrilus</i> n. sp.	Salinas, Rubelita, MG	Cerrado
<i>Rhinodrilus</i> n. sp.	Brasília, DF (Jardim Botânico)	Mata de galeria
<i>Rhinodrilus</i> n. sp.	Brasília, DF (Jardim Botânico)	Mata de galeria
<i>Rhinodrilidae</i> sp.1	Planaltina (Embrapa), DF	Cerradão
<i>Rhinodrilidae</i> sp.2	Planaltina (Embrapa), DF	Cerradão
<i>Rhinodrilidae</i> sp.3	Planaltina (Embrapa), DF	Cerradão
<i>Rhinodrilidae</i> sp.4	Planaltina (Embrapa), DF	Cerrado s.s.
<i>Rhinodrilidae</i> sp.5	Brasília (PN e JB de Brasília), DF	Mata de galeria
<i>Rhinodrilidae</i> sp.6	Brasília (PN e JB de Brasília), DF	Mata de galeria, Cerrado s.s.
<i>Urobenus brasiliensis</i>	Caxias, MA; Santana do Riacho (Serra do Cipó), Conceição do Mato Dentro, MG; Campo Verde, MT; Itaberá, Itatinga, SP	Cerrado, Gramíneas, área alagável, Floresta estacional
<i>Urobenus petreirei</i>	Caxias, MA	Cerrado
<i>Urobenus</i> sp.	Brasília, DF (Jardim Botânico)	Mata de galeria

ND=Não determinado. Fontes: Abe; Buck (1985), Bartz *et al.* (2009), Bruz *et al.* (2023), Caballero (1973), Depkat-Jacob *et al.* (2012a,b), Drummond *et al.* (2012, 2013, 2015), Feijoo; Brown (2023), Feijoo *et al.* (2017), Ferreira *et al.* (2023), James *et al.* (2023), Luederwaldt (1927), Mendes *et al.* (2017), Michaelisen (1926), Righi (1968b, 1971a,b,c, 1972, 1974, 1980a,b, 1984a,b,c,d, 1985, 1986, 1990, 1997), Righi; Guerra (1985), Righi; Lobo (1979), Silva (2016), Sousa *et al.* (2020), Coleção do MZUSP e da COFM.

Tabela 3 - Espécies de minhocas encontradas no Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocouçu estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
Benhamiidae		
<i>Dichogaster affinis</i>	Planaltina, DF; Inhaúma, Curvelo, MG; Alto Araguaia, Chapada dos Guimarães, Primavera do Leste, MT;	Buritizal, lavoura anual, gramíneas, área alagada, pastagem, Cerrado, plantio de <i>Eucalyptus</i> , sistema integrado
<i>Dichogaster annae</i>	Chapada dos Guimarães, MT	
<i>Dichogaster bolau</i>	Planaltina, DF; Caxias, MA; Paraopeba, Conceição do Mato Dentro, Cachoeira da Prata, MG; Bela Vista, MS; Alto Araguaia, Conquista d'Oeste, Chapada dos Guimarães, MT, São Carlos, SP	Floresta ombrófila densa, Pastagem, Cerrado, plantios florestais, sistema integrado
<i>Dichogaster gracilis</i>	Planaltina, DF; Cáceres (Serra da Campina), Conquista d'Oeste, Primavera do Leste, Campo Verde, MT; Itapeva, Itatinga, Itaberá, Itai, SP	Gramíneas, mata secundária, lavoura anual em plantio direto, Pastagem, Cerrado, sistema integrado, plantio de <i>Eucalyptus</i> , mata de galeria
<i>Dichogaster modiglianii</i>	Cáceres (Serra da Campina), MT	Mata secundária
<i>Dichogaster (Diplothecondrilus) saliens</i> (Beddard, 1893)	Planaltina, DF; Paraopeba, Cachoeira da Prata, MG; Terenos, MS; Chapada dos Guimarães, Cuiabá, Campo Verde, MT; Botucatu, Mirassol, Colina, Taciba, Itai, Rio Claro (Assistência), SP	Pastagem, lavoura em plantio direto, floresta estacional semidecidual, Cerrado, sistema integrado, plantio de <i>Eucalyptus</i> , margem de brejo
<i>Dichogaster</i> spp.	Planaltina, DF; Santa Helena, Planaltina de Goiás, GO; Ponta Porã, MS; Primavera do Leste, Campo Verde, Barra do Bugres, Tangará da Serra, MT; Itatinga, São Carlos, SP	Pastagem, lavoura em plantio direto, sistema integrado, plantio de <i>Eucalyptus</i> , mata de galeria, lavoura perene
Eudrilidae		
<i>Eudrilus eugeniae</i>	Brasília, DF; São José do Rio Preto, SP	Minhocultura

Continua

Continuação Tabela 3 - Espécies de minhocas exóticas encontradas no Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocoçu estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
Lumbricidae		
<i>Eisenia andrei</i>	Brasília, DF; Piracicaba, São José do Rio Preto, SP	Minhocultura
<i>Eisenia fetida</i>	Brasília, DF	Minhocultura
Megascolecidae		
<i>Amyntas corticis</i>	Goiânia, GO; Serra do Cipó, MG; Itapeva, Itaberá, Piracicaba, SP	Plantio florestal, floresta secundária
<i>Amyntas gracilis</i> (Kinberg, 1867)	Brasília, Planaltina, DF; Goiânia, Formosa, GO; Paraopeba, Cachoeira da Prata, São João del Rey, Cachoeira de Prata, MG; Balsamo, Botucatu, Campinas, Capão Bonito (FN Capão Bonito), Cedral, Cosmorama, Itai, Itapeva, Itariri, Itú, Meridiano, Mirassol, Monte Aprazível, Nova Granada, Piracicaba (ESALQ), São José do Rio Preto, Tabapuã, Tanabi, Uchoa, Votuporanga, SP	Floresta secundária, horta, Cerrado, pastagem, plantio <i>Pinus</i> , chiqueiro, jardim, floresta ombrófila mista, urbano, sistema agroflorestal
<i>Amyntas morrissi</i>	Piracicaba, SP	ND
<i>Metaphire californica</i>	Caetanópolis, MG; Piracicaba, SP	ND
<i>Pheretima darnleiensis</i>	Conceição do Mato Dentro, MG	ND
<i>Polypheretima elongata</i>	Catalão, GO; Curvelo, Caetanópolis, Cachoeira da Prata, MG; Piracicaba, SP	Sob gramíneas
<i>Polypheretima taprobanae</i>	Piracicaba, SP	ND
Ocneroдрilidae		
<i>Eukerria eiseniana</i>	Bela Vista, Terenos, MS; Cuiabá, MT	Gramíneas, áreas alagáveis, margem de rio, brejo
<i>Eukerria saltensis</i>	São Domingos, GO	ND
<i>Gordiodrilus habessinus</i>	Comodoro (Nova Alvorada), MT; Rio Claro, SP	Plantio café
<i>Gordiodrilus marcusii</i>	Britânia, GO; Rio Claro, SP	ND
<i>Ocneroдрilus occidentalis</i>	Bela Vista, MS; Primavera do Leste, MT	Lavoura anual em plantio direto, Cerrado

Continua

Continuação Tabela 3 - Espécies de minhocas exóticas encontradas no Cerrado, com indicação dos municípios e principais ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso de ocorrência. As espécies de minhocoçu estão indicadas com um asterisco (*)

Família e espécies	Municípios e estados	Ambientes, tipos de vegetação e sistemas de uso do solo
Rhinodrilidae		
<i>Pontoscolex corethrurus</i>	Planaltina (Embrapa, IFB, Águas Emendadas), Brasília (Jardim Botânico, Fazenda Água Limpa-UnB, PN de Brasília), DF; Porangatu, Caldas Novas (Rio Quente), São Domingos, Santa Helena, Silvânia, GO; Caxias, MA; Paraopeba, Inhaúma, Cachoeira da Prata, Curvelo (São José da Lagoa), Cactanópolis, Santana do Riacho (Serra do Cipó), Belo Horizonte (Gorduras, UFMG), Paraopeba, MG; Ponta Porã, Sidrolândia, Bataguassu, Bela Vista, Terenos, Coxim, MS; Cuiabá, Conquista d'Oeste, Comodoro (Nova Alvorada, Rio Cabixi), Primavera do Leste, Barra do Bugres, Tangará da Serra, Rondonópolis, MT; Adolfo, Águas de Santa Bárbara (Iaras), Altair, Álvares Florense, Américo de Campos, Avaré, Bady Bassit, Bálamo, Buritama, Cardoso, Cedral, Colina, Cosmorama, Dolcinópolis, Ecatu (Tanabi), Fernandópolis, Floreal, General Salgado, Ibirá, Icém, piguá, Irapuã, Itaberá (EE Itaberá), Itai, Itapeva, Itararé, Itariri, Itatinga (EE USP), Jales, José Bonifácio, Magda, Mendonça, Meridiano, Mirassol, Mogi das Cruzes, Monte Aprazível, Neves Paulista, Nhandeara (Ida Iolanda), Nova Aliança, Nova Granada, Novo Horizonte, Onda Verde, Palestina, Paranapuã, Paulo de Faria, Piracicaba (ESALQ), Potirendaba, Rio Claro (Assistência), Riolândia, Salto do Avanhandava, Santa Albertina, São Carlos (Embrapa, UFSCar), São José do Rio Preto, São Manuel, Tabapuã, Tanabi, Uchoa, Urupês, Valentim Gentil, SP	Horta, gramado, margem de riacho, Cerrado, pastagem, floresta estacional semidecidual, floresta secundária, <i>Eucalyptus</i> , floresta ombrófila densa, floresta ripária, capoeira, cultura agrícola, sistema agroflorestal, pastagem, área alagável, pomar, cerradão, mata de galeria, vereda

ND=Não determinado. Fontes: Aquino *et al.* (2000), Barreto (2019), Bartz *et al.* (2009), Bruz *et al.* (2023), Caballero (1973), Corrêa *et al.* (2007), Depkat-Jacob *et al.* (2012, 2013), Ferreira *et al.* (2023), Luederwaldt (1927), Michaelisen (1897, 1918), Miklós (2012), Righi (1965, 1967, 1968a,b, 1971a, 1972, 1980b, 1984a,b,c,d, 1990), Righi; Guerra (1985), Sousa *et al.* (2020), Vanucci (1953).

9.3 Considerações finais

O bioma Cerrado abrange 15 estados brasileiros, o segundo maior em extensão no país e abriga uma importante fauna e flora adaptada às suas características ambientais. A biodiversidade do solo, mundo afora, ainda é considerada uma caixa preta, com uma infinidade de organismos pouco conhecidos, mas que exercem funções essenciais para a manutenção da vida terrestre.

Ao compilar-se os estudos realizados no Cerrado brasileiro para organismos epiedáficos, macrofauna do solo e minhocas, evidenciou-se que este número ainda é insuficiente, considerando a dimensão deste bioma, e os estados com pouca ou nenhuma informação sobre estes organismos. No geral, foi possível observar como os sistemas de uso do solo afetam os organismos visíveis do solo, levando a redução da abundância e da riqueza de grupos e de espécies nos sistemas de uso do solo com manejo mais intensificado.

As informações apresentadas neste capítulo alertam sobre a necessidade de mais estudos em uma ampla gama de sistemas de uso do solo para gerar informações que permitam mostrar a realidade da biodiversidade do solo no bioma Cerrado que está ameaçado pelo avanço da fronteira agrícola. Existem ainda muitas espécies que necessitam ser descritas, como exemplificado para as minhocas nativas. Esta informação é importante considerando que os estudos em outras regiões do país têm demonstrado que o uso de práticas de manejo conservacionistas, como é o caso do Sistema Plantio Direto e seus desdobramentos com sistemas integrados, permitem também a conservação destas espécies e, portanto, o nosso patrimônio natural.

Referências

- ABE, A. S.; BUCK, N. Oxygen uptake of active and aestivating earthworm *Glossoscolex paulistus* (Oligochaeta, Glossoscolecidae). **Comparative Biochemistry and Physiology**, v. 81A, p. 63-66, 1985.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2nd Edition. CAB International, Wallingford, 1993.
- ANTONIOLLI, Z. I. *et al.* Método alternativo para estudar a fauna do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 407-417, 2007.
- **AQUINO, A. M.; RICCI, M. S.; PINHEIRO, A.S. Avaliação da macrofauna do solo em café orgânico e convencional utilizando um método modificado do TSBF. *In*: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 24.; Reunião Brasileira sobre Micorrizas, 8.; Simpósio Brasileiro de Microbiologia do Solo, 6.; Reunião Brasileira De Biologia do Solo, 2000, Santa Maria. **Fertbio 2000: biodinâmica do solo**. Santa Maria: UFSM/Departamento de Solos, 2000. 1 CD-ROM.
- AQUINO, A. M.; MENEZES-AGUIAR, E. de L.; QUEIROZ, J. M. de. **Recomendações para coleta de artrópodes terrestres por armadilhas de queda (Pitfall Traps)**. Seropéica: Embrapa Agrobiologia, 2006. 8 p. (Embrapa Agrobiologia, Circular técnica, 18).
- *ARIEDI JÚNIOR, V. R. *et al.* Invertebrados do solo em sistema conservacionista. **XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2020**.
- **BARBOSA, L. R. *et al.* Número de indivíduos e diversidade da fauna edáfica em áreas sob plantações de eucalipto em sequência de idade na região do Cerrado

Piauiense. *In: I Encontro Multidisciplinar do CPCE & I Seminário de Pós-Graduação da UFPI*. [S. l.: s. n.], 2014.

BARRETO, J. O. Populações de minhocas em áreas sob Plantio Direto em seis microbacias no sul e sudeste do Brasil. **Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental)**, Universidade Positivo, Curitiba. 89p. 2019.

BARTZ, M. L; PASINI, A; BROWN, G. G. Earthworms from Mato Grosso, Brazil, and new records of species from the state. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), v. 44, p. 934-939, 2009.

BATISTA, I. **Atributos edáficos e fauna do solo em áreas de integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado, Mato Grosso do Sul. 2011. 100 f. - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, [s. l.], 2011.

*BRAGA, D. M. **Diversidade e variabilidade espacial da fauna do solo em área de Cerrado, Maranhão, Brasil**. Trabalho de conclusão de Curso, Universidade Federal do Maranhão. 2017. 39 f. [s. l.], 2017.

BRUZ, L. S. M. *et al.* Earthworms in various agricultural and forest ecosystems in São Carlos-SP, Brazil. **Zootaxa**, v. 5255, p. 324-335, 2023.

BENITO, N. *et al.* **Impacto do desmatamento e da renovação de pastagem sobre a macrofauna edáfica do solo no Cerrado. [S. l.]: CD soil pastures, 2000.

BENTO, M. A. B. Avaliação da qualidade dos substratos minerados em cinco cascalheiras revegetadas no Distrito Federal. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), 2009, 128 f. Universidade de Brasília, [s. l.], 2009.

BEVILAQUA, L. S. **Avaliação visual da saúde de solos sob diferentes usos. Dissertação de Mestrado em Agroecologia e desenvolvimento rural. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), 2017, 149 p. Universidade Federal de São Carlos. 2017.

BOTTINELLI, N. *et al.* Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil Tillage Research**. v.146, p.118-24, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>.

BRIGANTE, J. **Comparação de algumas comunidades de macrofauna e microrganismos de solo, encontradas em áreas de mata e pastagem, em um Latossolo. 2000. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2000.

BROSSARD, M. *et al.* Analysis of an illustrative interaction between structural features and earthworm populations in Brazilian ferralsols. **Comptes Rendus - Geoscience, [s. l.], v. 344, n. 1, p. 41-49, 2012.

BROWN, G. G.; S. W. JAMES. Ecologia, biodiversidade e biogeografia das minhocas no Brasil. p. 297-381. *In: G. G. BROWN; C. FRAGOSO (Eds.). Minhocas na América Latina: biodiversidade e ecologia*. Londrina, PR: Embrapa Soja. 2007.

BROWN, G. G.; SAUTTER, K. D. Biodiversity, conservation and sustainable management of soil animals. *In: The XV International Colloquium on Soil Zoology and XII International Colloquium on Apterygota*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, p.1-9, 2009.

BROWN, G.G. *et al.* Terrestrial oligochaete research in Latin America: The importance of the Latin American Meetings on Oligochaete Ecology and Taxonomy. **Applied Soil Ecology** (Print), v. 69, p. 2-12, 2013.

-
- BROWN, G.G. *et al.* Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. *In: PARRON, L. M. et al. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica.* Brasília, v. 1, p. 122-154, 2015.
- BROWN, G. G. *et al.* The role of soil fauna in soil health and delivery of ecosystem services. *In: REICOSKY, D. (Org.). Managing soil health for sustainable agriculture.* Cambridge: Burleigh Dodds Publishing Co., v. 1, p. 197-241, 2018.
- BROWN, G. G. *et al.* **A checklist of magadrille earthworm (Annelida: Clitellata) species and subspecies of world.** Zanodo Data set Versão v4, 2024.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1077631>
- BROWN, G. *et al.* Soil macrofauna communities in Brazilian land-use systems. **Biodiversity Data Journal**, v.12, p.e115000 -, 2024. Disponível em:
<https://bdj.pensoft.net/article/115000/>.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018. ISSN 0038-0717, Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- **BUSSINGUER, A. P. **Efeito de diferentes usos do solo no Cerrado sobre a composição da fauna edáfica.** 2006. 119 f. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2006.
- ***CABALLERO, M. E. S. **Bionomia dos Oligochaeta terrestres da Região Norte-Ocidental do Estado de São Paulo.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto - SP, 1973.
- *CASTRO, L. C. S. *et al.* Diversity of epigeous soil macrofauna in spring and summer in two cultivated pasture systems and in the Brazilian Cerrado. *In: World Congress on Integrated crop-livestock-forest Systems.* Brasília, DF: Embrapa, Brasília, DF. 2015.
- **CATANOZI, G. Análise espacial da macrofauna edáfica sob diferentes condições ambientais dos trópicos úmidos. 2010. 202 f. – **Tese (Doutorado).** Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2010.
- *COELHO, J. V. *et al.* Diversidade da fauna edáfica de um latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 655–663, 2018. Disponível em:
<http://revista.ecogestaobrasil.net/v5n10/v05n10a18a.html>.
- CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, 420–426, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000400012>.
- **CORRÊA, R. S.; BENTO, M. A. B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1435-1443, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400039>.
- **COSTA, L. M.; SILVA, I. C.; BASÍLIO, S. A.; NEVES, M. A.; RAMOS, T. V. Identificação de macrofauna do solo em diferentes usos da terra. **Anais da semana de Ciências Agrárias e Jornada de pós-graduação em produção vegetal.** v. 15, p. 215-218, 2018.
- **CREMONESI M. V. *et al.* Soil macrofauna communities in various land use systems in Itatinga, São Paulo, Brazil. Version 1.9. Embrapa Forestry. **Samplingevent dataset.**

Disponível em:

https://ipt.sibbr.gov.br/sibbr/resource?r=soil_macrofauna_itatinga&v=1.9. 2023.

*CUNHA, J. R. *et al.* Epigeal invertebrate fauna in monoculture and integrated systems in the cerrado biome Piauí. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. e9910413888, 2021. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13888>.

*CUNHA, G. V. **Levantamento da artropodofauna no campus I da UNIRV Rio Verde – GO**. 2015. 12 f. [s. l.]. Trabalho de conclusão de Bacharelado em Ciências Biológicas, Universidade Federal de Rio Verde, 2015.

*DA COSTA, G. C. **Levantamento da macrofauna edáfica em reserva nativa no município de Perdizes/MG**. 2017. 27 f. [s. l.], 2017.

*DA SILVA, C. A. **Distribuição espacial de artrópodes do solo em área de Cerrado stricto sensu, Cerradão e Mata de Galeria no município de Codó, MA, Brasil**.

2018. 54 f. [s. l.], Trabalho de conclusão de Curso em Ciências Naturais/Biologia, Universidade Federal do Maranhão, Campus de Cadó, 2018.

DA SILVA, R. F. *et al.* Macrofauna invertebrada do solo sob diferentes sistemas de produção em Latossolo da Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 697–704, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400022>.

*DA SILVA, R. F.; AQUINO, A. M.; MERCANTE, F. M. Efeitos de diferentes sistemas de manejo do solo sobre estrutura populacional da macrofauna edáfica, em Mato Grosso do Sul. *In: FERTBIO, 2002, Rio de Janeiro, Resumos expandidos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA e UFRRJ (2002) (cd-rom).

DA SILVA, R. F. *et al.* Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 46, n. 10, p. 1277-1283, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000023>.

*DAIREL, K. S. **Fauna epigeica em diferentes usos da terra na região do Cerrado**. 2019. [s. l.]. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

DE LIMA, S. S. **Pastagens no Cerrado e a relação com os térmitas construtores de ninhos epígeos. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2012.

**DIAS, V. S.; BROSSARD, M.; LOPES ASSAD, M. L. Macrofauna edáfica invertebrada em áreas de vegetação nativa da região de Cerrados. P. 168-173. *In: LEITE, L. L.; SAITO, C. H. Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado*. Universidade de Brasília, Departamento de Ecologia, 1997.

DEPKAT-JAKOB, P. S. *et al.* Emission of Methane by *Eudrilus eugeniae* and other Earthworms from Brazil. **Applied and Environmental Microbiology** (Print), v. 7949, p. 1-6, 2012a. Disponível em: 10.1128/AEM.07949-11.

DEPKAT-JAKOB, P. S. *et al.* Emission of nitrous oxide and dinitrogen by diverse earthworm families from Brazil and resolution of associated denitrifying and nitrate-dissimilating taxa. **FEMS Microbiology, Ecology** (Print), v. 83, p. 375-391, 2012b. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01476.x>.

DRUMOND, M.A. *et al.* Life history, distribution and abundance of the giant earthworm *Rhinodrilus alatus* Righi 1971: conservation and management implications. **Brazilian Journal of Biology**, v.73 (n.4), p. 699–708, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842013000400004>.

DRUMOND, M. A.; BROWN, G. G.; FILHO, O. J. M. Avaliação do risco de extinção do minhocoçu *Rhinodrilus alatus* Righi, 1971. **Biodiversidade brasileira**, v. 2, p. 134–139, 2012.

DRUMOND, M. A.; GUIMARÃES, A. Q.; SILVA, R. H. P. The role of local knowledge and traditional extraction practices in the management of giant earthworms in Brazil. **PLoS ONE**, v. 10(4): e0123913. Disponível em: [doi:10.1371/journal.pone.0123913](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123913). 2015.

FEIJOO, M. A.; BROWN, G. G.; JAMES, S. W. New species of *Andiorrhinus Cognetti*, 1908 (Oligochaeta: Rhinodrilidae) from Venezuela and Brazil. **Zootaxa** (ONLINE), v. 4363, p. 55–78, 2017. Disponível em: [doi.10.11646/zootaxa.4363.1.2](https://doi.org/10.11646/zootaxa.4363.1.2).

FEIJOO, A.; BROWN, G. G. Three new *Glossoscolex* (Annelida: Crassicitellata: Glossoscolecidae) in the truncatus group from the Brazilian Atlantic Forest. **Zootaxa**, v.5255, p.220–234, 2023. Disponível em: [doi.10.11646/zootaxa.5255.1.21](https://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.21).

FELLER, C. L. *et al.* The principles of rational agriculture” by Albrecht Daniel Thaer (1752–1828), An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th century. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 166, 687–698, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.200321233>.

FERREIRA, J. J. **Macrofauna do solo como indicadora de qualidade do solo em São Pedro do Turvo/SP. Trabalho de Conclusão de Curso (especialização em Gerenciamento de Recursos hídricos e planejamento ambiental de bacias hidrográficas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2012.

FERREIRA, T. *et al.* Earthworm species in different land use systems in the state of Goiás and the Federal District of Brazil. **Zootaxa** (ONLINE), v. 5255, p. 283–303, 2023. Disponível em: [doi.10.11646/zootaxa.5255.1.24](https://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.24).

FAO - Food Agriculture Organization. **State of knowledge of soil biodiversity**. Rome, Italy, 2020. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/>.

FRANCO, R. Fauna edáfica sob modelos em estágio inicial de restauração de floresta subtropical. **Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

FRANCO, A. L. C. *et al.* Loss of soil (macro)fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of the Total Environment, [s. l.], v. 563–564, p. 160–168, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.116>.

*GONÇALVES, M. P. G. Fauna edáfica associada à unidade de conservação sob zona ecotonal do meio norte. 2023. 132 f. [s. l.], **Dissertação (Mestrado em Análise e Planejamento Espacial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí**, Teresina, 2023.

*GUALBERTO, A. V. S. *et al.* Epigeal fauna in no-till systems, pasture, eucalyptus and native savanna in Uruçuí, Piauí, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 1–8, 2021.

Disponível em:

<http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v16i3a8782>.

*INKOTTE, J. *et al.* Linking soil biodiversity and ecosystem function in a Neotropical savanna. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 169, p. 104209, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139321003322>.

*INKOTTE, J. *et al.* Litter removal impacts on soil biodiversity and eucalypt plantation development in the seasonal tropics. **Journal of Forestry Research**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 735–748, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11676-022-01524-y>.

ISO - International Organization for Standardization. **Soil quality Sampling of soil invertebrates Part 5: Sampling and extraction of soil macro-invertebrates - ISO/CD 23611-5**, 2012.

JAMES, S. W., BROWN, G. G. Earthworm ecology and diversity in Brazil. *In: Moreira, F. et al. Soil biodiversity in Amazonian and other Brazilian ecosystems*, United Kingdom, p. 56-116, 2006.

JAMES, S. W.; BARTZ, M. L. C.; BROWN, G. G. New Ocnerodrilidae genera, species and records from Brazil (Annelida: Crassiclitellata). **Zootaxa (ONLINE)**, v. 5255, p. 235-269, 2023. Disponível em: [10.11646/zootaxa.5255.1.22](https://doi.org/10.11646/zootaxa.5255.1.22).

*KIKUDA, R.; COSTA, S.; MACCAGNAN, D. H. B. Estrutura da comunidade de macroartropodes de solo em ambiente natural e antropizado no Parque Estadual da Serra de Caldas Novas. *In: Anais Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual de Goiás (CEPE/UEG: Como você transforma o mundo?)* Pirinópolis, 2018.

LAVELLE, P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. **Advances in Ecological Research**. v. 27, p. 93-132, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0).

LAVELLE, P.; LAPIED, E. Endangered earthworms of Amazonia: an homage to Gilberto Righi. **Pedobiologia**, v.47, p.419-427, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00207>.

LAVELLE, P. *et al.* Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, [s. l.], v. 42, p. S3–S15, 2006.

LOURENTE, E. R. P. *et al.* Macrofauna edáfica e sua interação com atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 17–22, 2007.

LUEDERWALDT, H. A coleção de minhocas (Oligochaeta) no Museu Paulista. **Revista do Museu Paulista**, v. 15, p. 545-556, 1927.

*LUZ, R. *et al.* Diversity of the Arthropod edaphic fauna in preserved and managed with pasture areas in Teresina-Piauí-Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 483–489, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842013000300483&lng=en&tlng=en.

MARCHÃO, R. L. **Interação lavoura-pecuária num Latossolo do cerrado: impacto na física, matéria orgânica e macrofauna. Tese de Doutorado em Agronomia, Universidade Federal de Goiás. 2007.

MARCHÃO, R. L. *et al.* Impacto de sistemas agrícolas nos atributos físicos, químicos e macrofauna num latossolo do oeste baiano. **Embrapa Cerrados: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 228, p. 30, 2008.

-
- **MENANDRO, L. M. S. Soil macrofauna responses to sugar straw removal for bioenergy production. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 944-657, 2019.
- *MUDREK, J. R.; MASSOLI JUNIOR, E. V. Estrutura da comunidade de artrópodes de solo em diferentes fitofisionomias da Reserva Particular do Patrimônio Natural – Sesc Pantanal, Brasil. **Holos**, [s. l.], v. 1, p. 60–67, 2014. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1622>.
- MENDES, T. A.; FARIA, R. K. N. S.; MALHEIROS, R. Análises de tipos de relevo e solos propícios à ocorrência de *Rhinodrilus motucu* Righi em municípios goianos segundo relatos populares. **Ciência e Natura**, v.39(1), p.59–73, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X23008>.
- MICHAELSEN, W. Organisation einiger neuer oder wenigbekannter regenwürmer von Westindien und Südamerika. **Zoologische Jahrbücher Abteilung für Anatomie**, v. 10, p. 359-388, 1897.
- MICHAELSEN, W. Die Lumbriciden, mit besonderer Berücksichtigung der bisher als Familie Glossosolecidae zusammengefassten Unterfamilien. **Zoologisches Jahrbücher, Abteilung für Systematik, Ökologie und Geographie der Tiere**, v. 41, p. 1-398, 1918.
- MICHAELSEN, W. Zur kenntnis einheimischer und ausländischer Oligochaeten. **Zoologischer Jahrbücher Abteilung für Systematik**, v. 51, p. 255-328, 1926.
- MIKLÓS, A. A. W. Biogênese do solo. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v.30, p.190-229, 2012.
- NADOLNY, H.S. *et al.* Recommendations for assessing earthworm populations in Brazilian ecosystems. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 55, p. 1-35, 2020.
- *NUNES, L. A. P. L. *et al.* Edaphic fauna in a vegetation gradient in the Sete Cidades National Park. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 79, n. 1, p. 45–51, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842019000100045&tlng=en.
- PAOLETTI, M.G. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.74, p.137-155, 1999.
- *POMPERMAIER, V. T. Efeito do uso de pastagens manejadas sobre a comunidade de Artrópodes Epígeos no Cerrado do Brasil. 2016. [s. l.], **Dissertação (Mestrado em Ecologia)**, Universidade de Brasília, 2016.
- **REZENDE, L. P. *et al.* Identificação da macrofauna do solo em pastagem de *Panicum maximum* Jacq. e área submetida à queimada no município de Sambaíba - MA. **Biodiversidade**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 155–166, 2017.
- RIGHI, G. Ocorrência de *Pheretima indica* no Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 17, p. 225-226, 1965.
- RIGHI, G. O gênero *Pheretima* Kinberg (Oligochaeta) no Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 19, p. 342-343, 1967
- RIGHI, G. Sobre alguns Oligochaeta do Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 28, p. 369-382, 1968a.
- RIGHI, G. Sobre duas espécies novas de Oligochaeta do Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 40, 545-549, 1968b.

-
- RIGHI, G. Sobre a família Glossoscolecidae (Oligochaeta) no Brasil. **Arquivos de Zoologia**, São Paulo, v. 20, p. 1-96, 1971a.
- RIGHI, G. Sobre alguns Oligochaeta brasileiros. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 25, p. 1-13, 1971b.
- RIGHI, G. A new genus and species of Ocnero-drilinae (Oligochaeta: Acanthodrilidae) from Brazil. **Zoologischer Anzeiger**, v. 186, p.388-391, 1971c.
- RIGHI, G. Contribuição ao conhecimento dos Oligochaeta brasileiros. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 25, p. 148-166, 1972.
- RIGHI, G. Notas sobre as Oligochaeta Glossoscolecidae do Brasil. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 34, p. 551-564, 1974.
- RIGHI, G. Alguns Oligochaeta, Ocnero-drilidae e Glossoscolecidae do Brasil. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 33, p. 239-246, 1980a.
- RIGHI, G. Alguns Megadrile (Oligochaeta, Annelida) brasileiros. **Boletim de Zoologia**, v. 5, p. 1-8, 1980b.
- RIGHI, G. **Minhocas de Mato Grosso e de Rondônia**. Brasília: SCT/PR-CNPq, 1990a. Programa do Trópico Úmido, Programa Polonoeste, Relatório de Pesquisa nº 12.
- RIGHI, G. On a collection of Neotropical Megadrili Oligochaeta. I. Ocnero-drilidae, Acanthodrilidae, Octochaetidae, Megascolecidae. **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, v. 19, 9-31, 1984a.
- RIGHI, G. On a collection of Neotropical Megadrili Oligochaeta. II. Glossoscolecidae, Lumbricidae. **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, v. 19, p. 99-120, 1984b.
- RIGHI, G. Oligochaeta Megadrili da região Centro-Oeste de Mato Grosso, Brasil. **Boletim de Zoologia**, v. 8, p. 189-213, 1984c. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1984.122192>.
- RIGHI, G. Oligochaeta Megadrili da Chapada do Guimarães, Mato Grosso. **Boletim de Zoologia**, v.8, p. 17-23. 1984d. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1984.122126>.
- RIGHI, G. Sobre *Rhinodrillus* e *Urobenus* (Oligochaeta, Glossoscolecidae). **Boletim de Zoologia**, v. 9, p. 231-257, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1985.122300>
- RIGHI, G. Sobre o gênero *Andiorrhinus* (Oligochaeta, Glossoscolecidae). **Boletim de Zoologia**, v. 10, p.123-151, 1986a. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1986.122346>
- RIGHI, G.; LOBO, D. A. Nova contribuição ao gênero *Glossoscolex* com sinopse do grupo giganteus (Oligochaeta, Glossoscolecidae). **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 39, p. 947-959, 1979.
- RIGHI, G.; GUERRA, A. T. Alguns Oligochaeta do norte e noroeste do Brasil. **Boletim de Zoologia**, v. 9, p. 145-157, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2526-3358.bolzoo.1985.122294>.
- RIGHI, G. Minhocas da América Latina: diversidade, função e valor. *In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 26., 1997, Rio de Janeiro. Informação, globalização, uso

do solo: Anais, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

RIGHI, G. Oligochaeta. *In*: BRANDÃO, C.R.; CANCELLO, E.M. **Bioiversidade do Estado de São Paulo, Brasil: síntese do conhecimento ao final do século XX.** Invertebrados Terrestres. São Paulo, p.13-21, 1999.

*ROANI, R. Macrofauna epiedáfica em sistemas integrados de produção agropecuária no cerrado. 2021. **Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)**, Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2021.

*ROCHA, G. O.; NETOO, M. C.; LOZI, L. R. Diversidade, riqueza e abundância da entomofauna edáfica em área de cerrado do Brasil Central. *In*: **VII Congresso de Ecologia do Brasil**, 2005, Caxambu. Anais, Sociedade de Ecologia do Brasil, 2005.

RUIZ CAMACHO, N.; LAVELLE, P.; JIMÉNEZ, J. **Soil macrofauna: field manual - technical level.** FAO, 2008.

SANTOS, D. P. *et al.* Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 1466–1475, 2016.

SANTOS, G. G. *et al.* Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 115–122, 2008.

SANTOS, D. P. *et al.* Macrofauna edáfica sob sistemas de manejo em Latossolo do Cerrado piauiense. *In*: 2013, Florianópolis. **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Florianópolis: [s. n.], 2013.

SANTOS, D. P. *et al.* Soil macrofauna associated with cover crops in an Oxisol from the southwest of Piauí state, Brazil. **Arquivos do Instituto Biológico, [s. l.], v. 87, n. May, 2020.

SANTOS, D. P. *et al.* Soil macrofauna in a Cerrado/Caatinga ecotone under different crops in Southwestern Piauí State, Brazil. **Ciência Rural, [s. l.], v. 47, n. 10, 2017.

SARDA, X. **Effet du Semis Direct sur la Macrofaune des sols tropicaux des Cerrados Brésiliens. 2004. 204 f. Mémoire d'Ingénieur. Ecole d'ingénieur d'Agro-économie Internationale 32, [s. l.], 2004.

SCHIEDECK, G. *et al.* Vista do Percepção de Agricultores Sobre o Papel das Minhocas nos Agroecossistemas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 856–859, 2009.

SILVA, R. H. P. Extração e comércio de minhocuçus em Minas Gerais: complexidades e incertezas socioambientais. **Dissertação (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre)**, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 82p. 2016.

*SILVA, R. A. Diversidade, estrutura e relações de escala da fauna invertebrada e de fisionomias de cerrado. 2021. 208 f. [s. l.], **Tese (Doutorado em Geociências)** Universidade Federal do Maranhão, 2021.

*SILVA, R. A. *et al.* Diversity of edaphic fauna in different soil occupation systems. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 647–657, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252019000300647&tlng=en.

*SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil fauna diversity indexes. **Bragantia**, [s. l.], v. 79, n. 1, p. 120–133, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052020000100120&tlng=en.

*SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M. Edaphic fauna and physico-chemical attributes of soil in different phytophysionomies of Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 103–110, 2022. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662022000200103&tlng=en.

*SOUSA, J. A. D. **Comunidades de artrópodes de serrapilheira em uma área do cerrado nordeste**. 2016. 39 f. [s. l.], 2016.

SOUSA, S. C.; AM, D. S. HERNÁNDEZ-GARCÍA, L. M., GUALTER, R. M. R.; ROUSSEAU, G. X. A new earthworm species of the genus *Rhinodrilus* (Rhinodrilidae, Clitellata) and new records of earthworm species from the Amazon -Cerrado-Caatinga transition in the State of Maranhão, Brazil. **Zootaxa**, 4810 (1), 169–174, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4810.1.11>.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M. **Decomposition in Terrestrial Ecosystems**. Oxford: Blackwell Science, 1979.

*VANOLLI, B. S. *et al.* Epigeic fauna (with emphasis on ant community) response to land-use change for sugarcane expansion in Brazil. **Acta Oecologica**, [s. l.], v. 110, p. 103702, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1146609X21000011>.

VANNUCCI, M. Biological notes. I. On the Glossoscolecid earthworm *Pontoscolex corethrurus*. **Dusenía**, v. 4, p. 287-300, 1953.

VENDRAME, P. S. R. Relações entre a mineralogia, fertilidade, acidez e macrofauna em Latossolos do Cerrado sob pastagem. 2008. 118 f. **Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual de Londrina, [s. l.], 2008.

VENDRAME, P. R. S. *et al.* Relationship between macrofauna, mineralogy and exchangeable calcium and magnesium in Cerrado Oxisols under pasture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, n. 8, p. 996-1001, 2009.

* estudos com fauna epiedáfica (armadilhas *Pitfall*)

** estudos com macrofauna do solo (monolitos)

*** estudo com populações de minhocas e identificação de espécies

CAPÍTULO 10

NEMATOIDES NAS CULTURAS DO CERRADO E PERSPECTIVAS DO CONTROLE BIOLÓGICO NO MANEJO INTEGRADO

Jessica da Mata dos Santos Monteiro
Márcia Gabriel
João Marcos Pereira Novais
José Olívio Lopes Vieira Júnior

Resumo

A ocorrência de fitonematoides no Cerrado representa uma grave ameaça às culturas agrícolas, resultando em sérios danos econômicos aos agricultores. A diversidade de espécies aliada à capacidade de adaptação aos diferentes ambientes, são fatores que complicam ainda mais a gestão desses organismos. Além disso, a expansão agrícola contribui para o aumento da pressão da população dos nematoides sobre as plantas cultivadas no cerrado, exigindo a adoção de estratégias eficazes de controle. Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas de manejo integrado, incluindo abordagens como o controle biológico, são fundamentais na mitigação dos impactos negativos desses organismos sobre as plantas. O controle biológico de fitonematoides é uma abordagem que utiliza organismos vivos, principalmente fungos e bactérias, para reduzir a população de nematoides que prejudicam as plantas nas culturas agrícolas. Por se tratar de uma estratégia que promove o equilíbrio natural dos ecossistemas agrícolas, reduzindo os danos às plantas além de contribuir para a produtividade das lavouras, o controle biológico é uma estratégia promissora, que por meio do uso de agentes biológicos, minimiza a aplicação de produtos químicos. Este capítulo aborda a presença e os desafios dos nematoides nas culturas do cerrado, destacando a importância do controle biológico como uma ferramenta promissora no manejo integrado desses organismos. Inicialmente, são apresentadas informações sobre a ocorrência dos nematoides e os impactos que causam nas culturas agrícolas, seguida de discussões das perspectivas no campo do controle biológico, destacando seu potencial como uma alternativa sustentável e eficaz. O manejo integrado de nematoides, que combina diferentes estratégias, como manejo cultural, genético e químico, juntamente com o controle biológico, é abordado como uma estratégia eficiente na redução dos danos causados pelos nematoides e na promoção da sustentabilidade da agricultura no cerrado. Por fim, as considerações finais destacam a relevância do monitoramento constante e da identificação correta dos nematoides, como atividades cruciais na construção de um programa de manejo de sucesso, enfatizando a contribuição do controle biológico na sustentabilidade e na produtividade das culturas no Cerrado.

10.1 Introdução

A agricultura brasileira se destaca no cenário agrícola mundial, especialmente na produção de grãos destinados à exportação. Mais da metade da área agrícola do país está concentrada nos limites do Cerrado, bioma que abrange uma extensão correspondente a

22% do território nacional e engloba os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí, Bahia, Rondônia, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Distrito Federal e fragmentos localizados no Amapá, Amazonas e Roraima (IBGE, 2010). Os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia formam o MATOPIBA, região que tem se destacado nas últimas décadas no seguimento agrícola (Paim; Assunção, 2023).

O desenvolvimento da agricultura no Cerrado teve início na década de 70, com a criação da EMBRAPA Cerrados, em Planaltina (DF), aliada a incentivos governamentais que impulsionaram a expansão agrícola no país. Como resultado, a agricultura nessa região experimentou ao longo dos anos um importante crescimento, que transformou o Cerrado em um dos principais biomas produtores de culturas temporárias, como a soja, o algodão, o milho e espécies de plantas forrageiras (Santana *et al.*, 2020). Esse fenômeno está vinculado aos avanços das biotecnologias, que propiciaram o desenvolvimento de variedades de plantas resistentes a estresses bióticos e abióticos, tolerantes a herbicidas, além de ferramentas capazes de reduzir a dependência de insumos químicos e pesticidas, como os produtos biológicos também denominados bioprodutos, comumente empregados como inoculantes, promotores de crescimento, e no controle de pragas e doenças (Bettiol; Morandi, 2009).

As formulações à base de microrganismos têm adquirido relevância crescente no cenário agrícola mundial, e o Brasil se destaca como o país que mais cresce em consumo e desenvolvimento desses produtos. Este fato pode ser explicado pelo extenso território cultivado e condições climáticas favoráveis, que por sua vez, dependem do manejo de pragas e doenças, e demandam por estratégias eficazes, humana e ambientalmente sustentáveis (Fontes; Valdares-Inglis, 2020).

A maioria dos produtos aplicados no controle biológico de pragas e doenças incorpora em sua formulação microrganismos que desempenham a função de agentes de biocontrole, capazes de suprimir as populações de organismos fitopatogênicos (Fontes; Valdares-Inglis, 2020). E, dentre os fitopatógenos do solo, os nematoides ganharam grande destaque nas últimas décadas, representando atualmente, uma das principais ameaças às culturas do cerrado brasileiro devido às perdas e danos que causam nas plantas cultivadas e os prejuízos econômicos aos agricultores.

Os principais nematoides de importância agrícola incluem *Meloidogyne* spp., *Pratylenchus* spp., *Heterodera glycines*, *Helicotylenchus* spp., *Aphelenchoides besseyi* e *Rotylenchulus reniformis* (Jones *et al.*, 2013). Exceto por *H. glycines*, todos esses nematoides são nativos do Brasil e comumente encontrados em amostras de solo em áreas de vegetação nativa e preservada (Mattos *et al.*, 2016). Geralmente nesses ambientes, devido à elevada diversidade de plantas e organismos do solo, as populações de nematoides parasitas de plantas estão em equilíbrio. No entanto, quando uma área de vegetação nativa é substituída por uma nova lavoura, o plantio em monocultivo de espécies de plantas suscetíveis ao parasitismo desses nematoides, aliado às altas temperaturas, principalmente nos períodos de safra, encurtam o ciclo de vida e criam condições favoráveis para o aumento da densidade populacional desses fitoparasitas (Lazarova *et al.*, 2021; Pimentel *et al.*, 2021).

A principal estratégia para reduzir a possibilidade de dano econômico causado por fitonematoides é a integração de práticas de manejo, tais como a rotação de culturas com plantas não hospedeiras, o uso de cultivares resistentes e a aplicação de nematicidas químicos e biológicos (Grigolli; Asmus, 2014). O controle biológico de nematoides se destaca principalmente por fatores como a ação direta do produto sobre o nematoide-alvo, custo menor quando comparado aos nematicidas químicos, segurança para o homem e o

meio ambiente, ausência de promoção de resistência de patógenos aos tratamentos, e compatibilidade dos bioprodutos com certos produtos químicos, como fungicidas e inseticidas (Bettiol; Morandi, 2009).

Por conseguinte, a compreensão do papel dos nematoides e suas interações no Cerrado, capacita o homem do campo a equilibrar as necessidades da agricultura com a preservação desse ecossistema vital para o Brasil e para o mundo. Nesse contexto, este capítulo explora a ecologia dos nematoides nas culturas do Cerrado com foco nos principais gêneros que impactam a agricultura na região. Além disso, são apresentados dados de análises nematológicas de cinco safras consecutivas realizadas no Laboratório de Nematologia da JCO Bioprodutos, informações valiosas que certamente servirão como base de apoio para a gestão sustentável das áreas agrícolas. Também será discutida a importância do controle biológico no contexto de manejo integrado de nematoides, abordando os principais microrganismos e seus modos de ação sobre esses patógenos, o cenário atual do mercado de bionematicidas no Brasil e no mundo, bem como os principais desafios, perspectivas e inovações de microrganismos com potencial para o desenvolvimento de novos bioprodutos.

10.2 Contextualização

10.2.1 Nematoides no Cerrado

Para além de sua importância intrínseca associada à preservação da biodiversidade, o Cerrado desempenha um papel vital na economia brasileira e se destaca como um dos principais pilares agrícolas do país. A fertilidade do solo nesse bioma, aliada às condições climáticas propícias, posiciona o Cerrado como uma região destacada para o cultivo de importantes commodities como soja, milho e algodão, fundamentais para a segurança alimentar e econômica do Brasil. Nesse contexto, torna-se essencial compreender e abordar os desafios que envolvem o Cerrado, especialmente no âmbito agrícola, cuja importância é indiscutível para a economia, embora, paradoxalmente, possa exercer pressões significativas sobre os ecossistemas regionais.

Os nematoides, vermes microscópicos pertencentes ao filo Nematoda, são organismos onipresentes no solo, encontrados em diversos habitats e nichos ecológicos, e emergem como um elemento crucial nessa equação, uma vez que sua presença pode exercer influência substancial na produtividade das plantas cultivadas no Cerrado. A maioria dos nematoides do solo possui um estilo de vida livre, alimentando-se de microrganismos como bactérias, fungos, algas, protozoários, pequenas minhocas ou oligoquetas, tardígrados, rotíferos ou outros nematoides. Alguns deles são parasitas de plantas superiores, alimentando-se principalmente dos órgãos subterrâneos, como raízes, rizomas, tubérculos, bulbos ou frutos hipógeos. Além disso, há aqueles que se adaptaram ao parasitismo nos órgãos da parte aérea, como caules, folhas, frutos e sementes. Outra categoria importante é representada pelos nematoides parasitas de animais, que se alimentam de vertebrados e invertebrados (Ferraz, 2018). Essa diversidade de hábitos alimentares destaca a complexidade e a versatilidade desses organismos, e evidencia seu impacto abrangente nos ecossistemas, incluindo o Cerrado.

Os hábitos alimentares dos nematoides do solo possibilitam sua categorização em grupos tróficos distintos. Fitoparasitas referem-se aos que se alimentam de plantas, micófagos consomem fungos, bacteriófagos alimentam-se de bactérias, predadores atacam outros nematoides e pequenos animais do solo, enquanto onívoros têm uma dieta diversificada, obtendo alimento de mais de uma fonte (Yeates *et al.*, 1993).

A morfologia da região anterior e da cavidade bucal dos nematoides é diversa e está intimamente ligada aos seus hábitos alimentares. Isso evidencia as adaptações especializadas desses organismos, com destaque para a complexidade de suas interações no solo. Nematoides fitoparasitas apresentam um estilete, mas, é importante ressaltar que nem todos os nematoides portadores de estilete são fitoparasitas, pois, muitos são micófagos, onívoros ou predadores. Assim, a presença do estilete na cavidade bucal do nematoide é uma condição necessária, mas não suficiente, para caracterizá-lo como parasita de planta. Os nematoides bacteriófagos são os mais comuns no solo e possuem uma cavidade bucal cilíndrica e estreita, sem a presença do estilete. Por outro lado, aqueles cuja cavidade bucal é ampla, globosa e equipada com dentes, denticulos e/ou placas cortantes são predadores de pequenos animais do solo, incluindo outros nematoides (Goulart, 2007).

No que diz respeito ao papel das cadeias alimentares nos processos ecológicos do solo, consumidores como os nematoides podem parecer relativamente menos significativos para o fluxo de energia, mas desempenham papéis cruciais como reguladores das taxas e velocidades das transformações no solo, como o processo de decomposição da matéria orgânica (Whitford *et al.*, 1982).

Os nematoides bacteriófagos excretam aproximadamente de 50% a 80% do material consumido, o que contribui diretamente para a decomposição da matéria orgânica (Trofymow; Coleman, 1982). E, de acordo com Wright e Newall (1976), a principal substância resultante dessa excreção é a amônia. Assim, a relevância dos nematoides nas culturas do Cerrado está intrinsecamente ligada à sua importância como componentes da biodiversidade, bem como aos seus potenciais impactos, independentemente de serem nematoides de vida livre ou fitoparasitas.

Nesse contexto, as dinâmicas populacionais dos nematoides de vida livre tendem a se sincronizar com aquelas dos microrganismos dos quais se alimentam (Mikola, 1998). Isso influencia as suas atividades e, por conseguinte, os processos nos quais estão envolvidos. Tanto os nematoides bacteriófagos, quanto os micófagos, desempenham um papel significativo na decomposição da matéria orgânica, o que eleva as taxas de mineralização de carbono (respiração) e de outros nutrientes (Micola; Setälä, 1998). Por outro lado, os nematoides predadores participam ativamente nos processos ecológicos do solo, regulam a mineralização de nutrientes por meio da predação de pequenos animais, e constituem assim um grupo condutor por meio do qual esses nutrientes são transferidos para níveis tróficos superiores nas cadeias alimentares (Wardle; Yeates, 1993). Essa interação complexa destaca a importância integral dos nematoides nos ecossistemas do solo e, por extensão, nas práticas agrícolas do Cerrado. Além disso, a qualidade do solo desempenha um papel importante na sustentabilidade agrícola, e, nesse contexto, os nematoides se apresentam como valiosos bioindicadores.

A presença e a diversidade dos nematoides no solo são frequentemente empregadas como indicadores da saúde do solo e dos impactos das atividades humanas no ambiente, e isso influencia diretamente a sustentabilidade produtiva. Um solo que abriga uma comunidade diversificada de nematoides geralmente denota um ambiente saudável e equilibrado. No entanto, em situações opostas, diversos fatores, a exemplo de estresses ambientais e sistemas de monocultivo agrícola, tendem a resultar no aumento das populações de nematoides parasitas de plantas (Niles; Freckman, 1998). Essa capacidade dos nematoides de servirem como bioindicadores confiáveis, destaca seu papel na avaliação e monitoramento da saúde do solo em ambientes agrícolas e proporcionam informações valiosas para práticas de manejo sustentável.

Na condição de patógenos, o Cerrado com sua ampla diversidade de ambientes e condições ecológicas, abriga uma grande variedade de nematoides fitoparasitas, que, ao se alimentarem das raízes das plantas, acarretam danos consideráveis às culturas, e resultam em impactos adversos para os agricultores. No contexto do parasitismo, os danos extensos infligidos às raízes das plantas culminam na redução da absorção de água e nutrientes e ocasionam, por conseguinte, a diminuição da produtividade agrícola. E dado que os agricultores dependem das colheitas para subsistência e lucro, essa diminuição na produtividade acarreta perdas econômicas substanciais.

Diante desse cenário, torna-se imperativo compreender a ecologia dos principais gêneros de nematoides e desenvolver estratégias de manejo eficazes para mitigar esses impactos negativos. A urgência dessa compreensão reside na necessidade de promover práticas agrícolas mais sustentáveis nas áreas do Cerrado, e, a implementação de medidas preventivas e corretivas, embasadas no conhecimento aprofundado da ecologia desses nematoides, é crucial para preservar a saúde das plantas, a produtividade das culturas e, consequentemente, a estabilidade econômica dos agricultores na região.

As perdas na agricultura decorrentes do ataque desses organismos podem variar desde ocorrências quase imperceptíveis nas lavouras até a aniquilação da maioria das plantas, o que pode inviabilizar completamente as áreas de plantio. Estima-se que as perdas anuais causadas por fitonematoides em todo o planeta atinjam cerca de 100 bilhões de dólares, o que representa aproximadamente 12% de toda a produção agrícola mundial (Silva *et al.*, 2019). No Brasil, dados da Sociedade Brasileira de Nematologia, em parceria com a consultoria Agroconsult e a Syngenta em 2022, indicam perdas causadas por fitonematoides em torno de R\$ 65 bilhões, sendo R\$ 27,7 bilhões apenas na cultura da soja. Essas cifras ressaltam a magnitude dos desafios enfrentados pelos agricultores e a necessidade premente de estratégias eficazes de manejo para mitigar os impactos econômicos desses nematoides nas atividades agrícolas no Cerrado.

Nos últimos anos, no Brasil, há um consenso quanto ao "ranking" dos nematoides de maior relevância, especialmente no Cerrado. A exemplo da cultura da soja, os nematoides das galhas *Meloidogyne* spp. (Goeldi, 1929) e o nematoide de cisto da soja (SCN), *Heterodera glycines* (Ichinoe), se destacam como os nematoides economicamente mais significativos no Brasil e em escala global (Moens *et al.*, 2010). A introdução e o estabelecimento de *H. glycines* na região do Cerrado provocaram mudanças substanciais no manejo de fitonematoides no Brasil, com a adoção de plantas alternativas para a rotação de culturas associada ao aumento de áreas com a prática de plantio direto (Silva, 1999). Essas transformações exerceram um impacto direto nas populações de *Pratylenchus brachyurus* (Godfrey, 1929), Filipjev e Sch. Stekhoven (1974), que, segundo Machado *et al.* (2014), atualmente, emerge como um dos grandes desafios para a cultura da soja nos campos brasileiros. Devido à crescente incidência em culturas de grande importância agrícola, a essa lista somam-se os nematoides considerados de importância emergente, tais como os nematoides espiralados membros da família Hoplolaimidae (*Helicotylenchus* sp. (Steiner, 1945) e *Scutellonema* sp. (Andrassy, 1958), o *Aphelenchoides besseyi* (Christie, 1942), *Tylenchorhynchus* sp. (Cobb, 1913) e *Gracilacus* sp. (Raski, 1962). Essa dinâmica evidencia a necessidade contínua de monitoramento e aprimoramento de estratégias de manejo para enfrentar os desafios apresentados por esses nematoides nas principais culturas do Cerrado.

Diante do exposto, é pertinente relatar os dados das análises nematológicas realizadas pelo Laboratório de Nematologia da JCO Bioprodutos. Esses dados abrangem a diversidade de fitonematoides identificados e quantificados ao longo de cinco anos (setembro de 2018 a outubro de 2023) em diversas culturas, a maioria cultivada em áreas

do Cerrado. Com o objetivo de demonstrar e valorizar o grande compromisso assumido com a pesquisa e desenvolvimento de bioprodutos no setor agrícola, a empresa JCO Bioprodutos oferece serviços de assessoria pré e pós-venda aos seus clientes e parceiros, uma atividade abrangente que inclui análises agrícolas em diversas áreas, como nematologia, fitopatologia, solos e sementes, com foco na qualidade e eficácia de seus produtos, visando atender às necessidades específicas dos agricultores.

Nesse contexto, entre amostragens com objetivos experimentais e exploratórios, o Laboratório de Nematologia da JCO Bioprodutos analisou, no período citado, um total de 31.047 amostras de solo e/ou raiz, divididas em cinco intervalos. O primeiro representado pela safra 2018/2019, no qual foram analisadas 2.949 amostras; 2019/2020, com 6.209 amostras; 2020/2021, com 6.519 amostras; 2021/2022, com 6.830 amostras; e 2022/2023, com 8.540 amostras. Essas amostras originam-se de áreas agrícolas de diferentes regiões do país, destacando-se o Nordeste, representado por 70,2% de todas as amostras analisadas, indicando uma forte presença e demanda pelos serviços da JCO nessa região. As demais regiões, como Norte (15%), Centro-Oeste (9,3%), Sudeste (5,4%) e Sul (0,1%), também contribuíram para a diversidade geográfica das amostras analisadas, e demonstram a presença da empresa em todo o país, seja por representação comercial ou por parcerias, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Distribuição do Cerrado, indicando as regiões amostradas e de atuação da JCO Bioprodutos



Fonte: Elaborado por Wanderson Castro – Designer Gráfico da JCO Bioprodutos, 2024.

As amostras analisadas foram coletadas de áreas cultivadas com um total de 53 culturas diferentes, sendo a soja (61,6%), milho (9,9%), algodão (8,5%), feijão (4,5%), braquiária (2,5%) e cana-de-açúcar (2,1%), as principais culturas, representando 89,1% de toda a amostra analisada. As demais culturas incluem fruteiras e hortaliças variadas, além de plantas de cobertura.

Ao longo dos cinco anos, identificaram-se pelo menos 27 gêneros e/ou espécies de fitonematoides, a saber: *Aphelenchoides besseyi*, *Belonolaimus* sp., *Cactodera* sp., *Criconemella* sp., *Ditylenchus* sp., *Discocriconemella* sp., *Ecpfyadophora* sp., *Gracilacus* sp., *Helicotylenchus* sp., *Hemicriconemoides* sp., *Hemicycliophora* sp., *Heterodera glycines*, *Hirschmanniella* sp., *Hoplolaimus* sp., *Meloidogyne* sp., *Paratrachodoros* sp., *Paratylenchus* sp., *Paraxiphidorus* sp., *Pratylenchus* sp., *Radopholus similis*, *Rotylenchulus reniformis*, *Rotylenchus* sp., *Scutellonema* sp., *Trichodoros* sp., *Tylenchorhynchus* sp., *Tylenchus* sp. e *Xiphinema* sp.

Ademais, determinou-se a abundância dos nematoides de vida livre e a identificação em nível de gênero, não para todas as regiões amostradas, mas sim para algumas áreas experimentais. Os gêneros identificados incluem *Acrobeles* sp., *Acrobeloides* sp., *Aphelenchus* sp., *Cephalobus* sp., *Cervidellus* sp., *Cruznema* sp., *Diplogaster* sp., *Drilocephalobus* sp., *Eudorylaimus* sp., *Heterocephalobus* sp., *Mesorhabditis* sp., *Metacrobeles* sp., *Mononchus* sp., *Panagrolaimus* sp., *Pelodera* sp., *Plectus* sp., *Prismatolaimus* sp., *Scotema* sp., *Thonus* sp., *Wilsonema* sp., *Zeldia* sp., e membros das famílias Dorilaimidae e Tylenchidae. Os nematoides de maior incidência e densidade populacional são os mesmos considerados os principais fatores limitantes do desenvolvimento das plantas (Quadro 1).

Quadro 1 - Dados de incidência dos principais fitonematoides e dos nematoides de importância emergente nas amostras analisadas durante as cinco safras. Laboratório de Nematologia, JCO Bioprodutos, Barreiras, Bahia

Gêneros	Incidência (%) por safra				
	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023
1 <i>Pratylenchus</i> sp.	64,4	76,4	70,2	76,2	80,2
2 <i>Helicotylenchus</i> sp.	62,7	42,3	48	58,8	57,2
3 <i>Meloidogyne</i> sp.	31	14,3	15,6	11,4	12,5
4 <i>H. glycines</i>	12	4,2	10,8	14,1	12,4
4 Cistos de <i>H. glycines</i>	12,1	1,8	10,3	9,6	8,5
5 <i>R. reniformis</i>	5,2	2,3	2,2	4,7	1,2
- <i>Tylenchorhynchus</i> sp.	2,3	2,5	2,8	3,8	2,5
- <i>Scutellonema</i> sp.	0,2	0,1	0,2	0	0
- <i>Gracilacus</i> sp.	0,2	0,4	0,4	0,8	2,4

Fonte: Os Autores (2024).

Os dados analisados destacam *Pratylenchus* sp. como o fitonematoide preponderante, suscitando grandes preocupações sobre seu impacto ao longo de cinco safras consecutivas pelas maiores incidências nas amostras, seguido por *Helicotylenchus* sp., *Meloidogyne* sp., *H. glycines*, *R. reniformis*, e os nematoides emergentes, *Tylenchorhynchus* sp. e *Gracilacus* sp.

A caracterização em nível de espécie revelou que *P. brachyurus* apareceu como a espécie dominante em grande parte das amostras, seguido pela presença frequente de uma população mista, composta predominantemente por *P. brachyurus* e *P. zaeae*, que também foi detectada em população pura em diversas amostras. Além das espécies mencionadas, a presença de *P. penetrans* foi identificada, especialmente em amostras de soja, evidenciando a diversidade específica desse gênero presente nas lavouras. *Pratylenchus coffeae* também se destacou, sendo frequentemente detectado em amostras de banana

provenientes dos estados da Bahia e Minas Gerais. Notavelmente, uma quinta espécie, ainda não confirmada a sua identidade foi encontrada em diversas amostras, sobretudo aquelas originárias do estado de Tocantins, adicionando uma camada de complexidade à compreensão da problemática relacionada ao *Pratylenchus* sp. As densidades populacionais de *Pratylenchus* sp. ao longo das cinco safras exibiram variações marcantes (Quadro 2). Essa oscilação ressalta a dinâmica complexa e variável da população desses fitonematoídeos ao longo do tempo, o que demanda uma abordagem cuidadosa e adaptativa para o seu manejo.

Helicotylenchus sp., o segundo fitonematoídeo mais incidente nas lavouras, demonstra uma amplitude de densidades populacionais inferior quando comparada à de *Pratylenchus* sp., no entanto, não devem ser menosprezadas, uma vez que se trata de um nematoídeo cuja importância econômica já está estabelecida. Pois, mesmo considerado secundário, sua capacidade de impactar negativamente as culturas permanece significativa. Além disso, a aparente diminuição nas densidades populacionais não diminui a relevância do *Helicotylenchus* sp., pois sua presença continua a representar um desafio generalizado para as plantas, destacando a necessidade constante de vigilância e monitoramento para conhecer a realidade sobre a sua dinâmica populacional e assim implementar estratégias de manejo eficazes para mitigar os impactos adversos desse fitonematoídeo nas práticas agrícolas.

Diferente do observado na região sul do Brasil por Machado *et al.* (2019), *Scutellonema* sp., outro nematoídeo espiralado, não demonstrou uma presença generalizada nas análises realizadas no Laboratório de Nematologia da JCO Bioprodutos. E, considerando que a grande maioria das amostras analisadas provém da região nordeste, mais especificamente, do Oeste da Bahia, os dados sugerem que, até o momento, esse nematoídeo não se configura como uma limitação significativa para a agricultura nesta região. Essa distinção nas observações ressalta a importância de se considerar as variações regionais na ocorrência de fitonematoídeos, e sugere que as condições específicas de cada região podem influenciar a presença e a prevalência desses organismos. A constatação de que *Scutellonema* sp. não está amplamente difundido na região Oeste da Bahia é, por outro lado, muito valiosa para orientar estratégias de manejo e prevenção em áreas onde esse nematoídeo ainda não representa uma ameaça significativa à agricultura local.

O gênero *Meloidogyne* sp., reconhecido como o de maior importância econômica em escala global, surge em terceiro lugar em termos de incidência (Quadro 1). No entanto, a variação na densidade populacional deste nematoídeo é notável, e o eleva a uma posição de destaque em todas as safras estudadas (Quadro 2). Essa flutuação significativa nas densidades populacionais destaca a dinâmica complexa do *Meloidogyne* sp., e indica uma grande capacidade adaptativa ao longo dos anos. E, apesar de se posicionar em terceiro lugar em termos de incidência, a amplitude nas densidades populacionais mostra a relevância desse nematoídeo e sua capacidade de exercer pressão populacional considerável sobre as culturas ao longo do tempo. Esses dados ressaltam a importância de estratégias contínuas de monitoramento e manejo para lidar com a presença variável e impactos potencialmente significativos do *Meloidogyne* sp. nas lavouras.

Dentre as principais espécies desse gênero, destacam-se *M. incognita*, *M. javanica*, *M. arenaria* e *M. hapla*, sendo as duas primeiras as de maior ocorrência e importância para a maioria das plantas cultivadas. A aplicação do método de eletroforese da isoenzima esterase em algumas amostras proporcionou a identificação específica de *M. javanica* e *M. incognita* na maioria das amostras submetidas a essa análise, confirmando o caráter principal dessas espécies em termos de ocorrência nas culturas, sobretudo nas do cerrado. No entanto, outras espécies como *M. ethiopica* e *M. enterolobii* também foram detectadas

em algumas amostras de feijão e soja coletadas no Oeste da Bahia. A identificação em nível de espécie, baseada em técnicas avançadas como a eletroforese de isoenzimas e/ou técnicas moleculares, é de extrema importância para compreender de modo mais assertivo, a composição específica das populações de *Meloidogyne* presentes nas culturas, e o destaque para *M. javanica*, *M. incognita*, *M. ethiopica* e *M. enterolobii*, confirmadas nesses dados, enfatiza a importância de direcionar esforços de manejo e controle para essas espécies, preservar a saúde e a produtividade das lavouras, especialmente em regiões como o cerrado, onde esses nematoides, principalmente *M. javanica* e *M. incognita*, têm presença endêmica.

Quadro 2. Dados de amplitude das populações dos principais fitonematoides e dos nematoides de importância emergente nas amostras analisadas durante as cinco safras. Laboratório de Nematologia, JCO Bioprodutos, Barreiras, Bahia

Gênero e/ou espécie	Números mínimos e máximos de indivíduos de cada gênero e/ou espécie detectados em uma amostra durante as cinco safras*									
	2018/2019		2019/2020		2020/2021		2021/2022		2022/2023	
	<	>	<	>	<	>	<	>	<	>
<i>Pratylenchus</i> sp.	3	4.950	5	89.681	7	739.520	10	42.507	3	72.092
<i>Helicotylenchus</i> sp.	3	45.500	5	6.000	8	41.000	1	24.826	5	35.350
<i>Meloidogyne</i> sp.	1	750.839	4	269.720	9	670.637	10	700.000	10	848.667
<i>H. glycines</i>	10	21.050	9	5.800	16	9.050	9	4.800	15	11.000
<i>Cistos de H. glycines</i>	4	2.450	20	1.000	2	2.592	20	2.000	20	2.640
<i>R. reniformis</i>	10	5.775	6	7.150	15	9.050	9	4.750	50	6.900
<i>Tylenchorhynchus</i> sp.	27	1.850	8	2.000	25	1.300	24	1.650	16	1.150
<i>Gracilacus</i> sp.	5	1.362	10	1.350	50	450	34	929	45	58.500

*Os valores representam o número de indivíduos detectados em uma única amostra de 100 cm³ solo e/ou 10 g de raiz. Legenda: <: Menor nível populacional detectado em uma amostra; > Maior nível populacional detectado em uma amostra.

Fonte: Os Autores (2024).

Heterodera glycines, um nematoide de hábito de parasitismo sedentário onde cada fêmea produz numerosos ovos em matriz gelatinosa, está presente em todas as regiões do Brasil e do mundo onde se cultiva soja. Neste levantamento, esse nematoide ocupa a quarta posição em termos de incidência, tanto em relação aos ovos + J2 quanto às fêmeas encistadas no solo. A amplitude dos níveis populacionais foi menor até do que a do *Pratylenchus* sp., um nematoide migrador, cujas fêmeas produzem ovos individuais e em quantidades menores. Mas esses fatos, não anulam a capacidade de *H. glycines* de exercer pressão e causar danos consideráveis nas culturas que afetam como a soja e o feijão, o que reforça a necessidade de estratégias contínuas de monitoramento e manejo.

Rotylenchulus reniformis, o nematoide reniforme, tem sido relatado em todas as regiões brasileiras e visto como uma ameaça particularmente significativa para culturas como algodão, soja e feijão. Esse nematoide foi observado com baixas incidências e menores níveis populacionais ao longo dos anos, quando comparado aos outros fitonematoides, principalmente *Meloidogyne* sp. e *H. glycines*, de hábito de parasitismo igualmente sedentário. Essa posição de *R. reniformis* de menores amplitudes de densidade populacional, juntamente com as baixas incidências ao longo dos anos, sugere uma prevalência limitada em comparação com outros fitonematoides analisados. E apesar de ser reconhecido como uma ameaça potencial, a variação nas densidades populacionais indica que esse nematoide não tem exercido uma pressão alarmante durante os períodos

analisados. No entanto, é crucial continuar monitorando e estudando sua dinâmica populacional para entender melhor seu comportamento e potencial impacto nas culturas afetadas.

O gênero *Tylenchorhynchus* é um fitonematoide muito comum, amplamente encontrado nas rizosferas de plantas cultivadas em solos brasileiros. Embora haja relatos de danos causados por espécies desse gênero em lavouras dos Estados Unidos da América (Handoo *et al.*, 2014), essa ocorrência ainda é rara no Brasil. No entanto, a contínua frequência de sua detecção no país chama a atenção para a necessidade de monitoramento, uma vez que *Tylenchorhynchus* sp. tem sido identificado e quantificado em todos os períodos analisados, principalmente em amostras de rizosferas de soja. Este nematoide é um ectoparasita migrador, geralmente encontrado em maior quantidade em amostras de solo. Recentemente no Brasil, *Tylenchorhynchus* sp. foi apontado como o causador primário de reboleiras de plantas em lavouras de soja cultivar "BRS 1061" no município de Dourados, Mato Grosso do Sul, com diferentes graus de subdesenvolvimento e densidades populacionais significativas, com até 7.488 espécimes por 200 cm³ de solo e 1.320 espécimes por 10 gramas de raiz (Asmus *et al.*, 2023).

De modo semelhante, o gênero *Gracilacus* sp., é um fitonematoide que tem crescido nas lavouras em termos de incidência e densidade populacional. Esses dados servem como alerta, demonstrando que é preciso atenção em relação a prevalência de *Gracilacus* sp. nas áreas cultivadas, e indicam ainda, que esses nematoides podem se tornar limitadores significativos para o desenvolvimento e a produtividade da cultura da soja no Brasil, se destacando como novas ameaças que podem surgir. Nesse sentido, o monitoramento contínuo é crucial para a implementação de estratégias de manejo visando a redução de potenciais impactos adversos.

10.3 Perspectivas no campo do controle biológico de nematoides

Por muitos anos a principal forma de controle de nematoides foi através do controle químico. Estes produtos, além de apresentarem custo de aquisição elevado, atuam apenas na fase infectante dos nematoides com amplo espectro ação, ou seja, atingem tanto o nematoide-alvo como também inimigos naturais que estão presentes no solo e ajudam no controle natural de fitopatógenos (Eisenhauer *et al.*, 2010). Além disso, alguns nematicidas foram proibidos em diversos países da Europa, Ásia e América do Norte devido à elevada toxicidade (Atolani; Fabiyi, 2020). Neste sentido, o controle biológico tem ganhado a cada dia mais relevância, principalmente por reduzir a dependência de nematicidas químicos, como única opção para o controle dos nematoides.

A utilização de produtos biológicos na agricultura cresceu significativamente na última década, e desde o início dos anos 2000, novos produtos têm sido registrados e estão disponíveis no mercado (Fontes; Valadares-Inglis, 2020). O crescimento significativo no setor aponta que o mercado de biológicos irá triplicar o seu valor até o ano de 2030. Este aumento está associado ao interesse de empresas do setor agrícola que buscam investir em produtos eficientes e com baixo custo de desenvolvimento, principalmente, quando comparado com insumos químicos (Bettiol *et al.*, 2012).

As principais culturas agrícolas com produtos biológicos registrados no MAPA são soja, milho, cana-de-açúcar e café (AGROFIT, 2023). Estas culturas possuem variedades que são suscetíveis a diversas espécies de nematoides. Para o controle biológico destes patógenos, a maior parte dos bionematicidas possuem em sua formulação fungos e bactérias que atuam como agentes de biocontrole, e, dentre os principais fungos utilizados

no controle de nematoides, podem ser citados o *Purpureocillium lilacinum* (syn = *Paecilomyces lilacinus*), *Pochonia chlamydosporia* (syn = *Verticillium chlamydosporium*) e espécies de *Trichoderma*, registrados como bionematicidas no Brasil até o momento (Bettiol *et al.*, 2019; Poveda *et al.*, 2020).

P. lilacinum e *P. chlamydosporia* são fungos nematófagos quitinolíticos com mecanismos de ação similares. Além disso, ambos possuem fase saprofítica, propriedade que lhe faculta a sobrevivência no solo mesmo na ausência de fitonematoides. Por outro lado, são endofíticos e colonizam os espaços intercelulares do córtex radicular. No processo de parasitismo dos nematoides, esses fungos atuam na redução da capacidade reprodutiva desses patógenos através da colonização dos ovos, fêmeas e cistos (Poveda *et al.*, 2020). Além do parasitismo, estes fungos liberam compostos tóxicos no solo, como aurovertina e chlamyphilone, que atuam no biocontrole de diversas espécies de nematoides fitoparasitas (Lacatena *et al.*, 2019).

Em relação as bactérias, os gêneros *Pasteuria* e *Bacillus* estão entre os principais agentes de biocontrole de nematoides. *Pasteuria nishizawae* é a única espécie do gênero com produtos registrados no Brasil e recomendados para o controle de *Heterodera glycines* na cultura da soja (Lund *et al.*, 2018). No gênero *Bacillus*, oito espécies compõem os princípios ativos de bionematicidas registrados, sendo *B. subtilis*, *B. amyloquefasciens*, e *B. licheniformis* as principais com maiores números de produtos visando biocontrole de nematoides. Trata-se de um grupo de bactérias produtoras de estruturas de resistência denominadas endósporos, que ao serem inoculadas na semente ou aplicadas no solo, secretam substâncias enzimáticas com propriedades que alteram o comportamento dos nematoides, o que dificulta o encontro da planta hospedeira pelo patógeno (El-Nagdi; Abd-El-Khair, 2019).

A tendência atual é que, com a intensificação de pesquisas no ramo do controle biológico, novas cepas e espécies de microrganismos que apresentem as características desejáveis para um agente de biocontrole sejam utilizadas na formulação de novos bioprodutos. Pois, além dos fungos e bactérias já citadas, outros grupos de microrganismos menos conhecidos vêm sendo estudados por terem despertado interesse como agentes de biocontrole de nematoides, com potencial para o desenvolvimento de novos bionematicidas, e dentre eles podem ser citadas as microalgas, outras bactérias, actinobactérias, outros fungos e fungos leveduriformes (Kumar; Dara, 2021).

As microalgas são cianobactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico que atuam na promoção de crescimento de plantas e são capazes de produzir compostos com potencial inibidor da eclosão de ovos de *Meloidogyne*. Um exemplo de microalga que tem se destacado como bionematicida é a *Spirulina platensis* (Hamouda; El-Ansary, 2019), base de um produto registrado nos Estados Unidos e na Costa Rica para o controle de *Meloidogyne* e *Pratylenchus* (Bettiol *et al.*, 2012). No Brasil, em testes *in vitro* desenvolvidos pela equipe de pesquisadores da JCO Bioprodutos, utilizando uma cepa dessa mesma espécie de microalga (batizada de JCOMA 004) sobre ovos e juvenis de *M. javanica*, foi observada a interrupção da embriogênese do ovo e morte dos juvenis do segundo estágio já eclodidos com redução da população em até 100% nos três períodos avaliados, 24, 48 e 72 horas de incubação (Gabriel *et al.*, 2023b). Este resultado confirma o potencial de *S. platensis* de ser considerada no manejo de fitonematoides também no Brasil.

Saccharomyces cerevisiae é um fungo leveduriforme promotor de crescimento de plantas com potencial de biocontrole de nematoides, além de ter a capacidade de se multiplicar rapidamente, produzir enzimas degradadoras de quitina, bem como induzir a

ativação de mecanismos de resistência da planta hospedeira (Karajeh *et al.*, 2013). Cepas de *S. cerevisiae* têm apresentado potencial para reduzir populações de *M. javanica* em plantas de interesse agrícola (Karajeh *et al.*, 2013). No Brasil, testes realizados em condições *in vitro* com a levedura *Meyerozyma guilliermondii* demonstraram sua capacidade de interferir no processo de embriogênese dos ovos e impedir sua evolução para a formação do estágio juvenil. Além disso, a presença dessa levedura resultou na mortalidade dos juvenis de *Meloidogyne* sp. e *H. glycines*, tanto dentro dos ovos como após a eclosão (J2). As amostras tratadas com a levedura também apresentaram um maior número de ovos inviáveis, o que resultou em uma redução significativa, entre 95% e 100%, no número de espécimes vivos após 24, 48 e 72 horas de incubação em comparação com as amostras não tratadas. Por outro lado, a levedura colonizou tanto os ovos quanto o corpo dos J2 de *H. glycines*, com completa eliminação da população de J2 vivos após 24 horas de incubação e mantendo esse resultado após 48 e 72 horas (Gabriel *et al.*, 2022). *Meyerozyma guilliermondii* é sem dúvida uma levedura com características desejáveis para um agente de biocontrole, logo, com potencial para ser utilizada na formulação de novos bionemáticas.

Outra classe de bactérias que tem se destacado pela ação que exerce sobre os nematoides são as Actinobactérias, que são bactérias com características de fungos, caracterizadas pela produção de metabólitos com ação biocida (Kaura *et al.*, 2016; Bezerra; Monteiro, 2021). As actinobactérias atuam no biocontrole de patógenos por meio de mecanismos como produção de antibióticos, enzimas líticas e indução a resistência (Elabyad *et al.*, 1993; Samac; Kinkel, 2001). Um exemplo clássico desse grupo é o caso de *Streptomyces avermitilis*, responsável por produzir a abamectina, um composto tóxico a nematoides que ao ser isolado e sintetizado se tornou ingrediente ativo de diversos nematicidas químicos. Compostos produzidos por *Streptomyces* sp. provocam a decomposição da quitina que dissolvem os ovos e a cutícula de juvenis (Yoon *et al.*, 2012). E além de *S. avermitilis*, várias referências mundiais comprovam a eficiência nematicida de dezenas de espécies de bactérias da mesma classe sobre importantes fitonematoides, principalmente, *M. incognita*.

No Oeste da Bahia, Brasil, foi isolada do solo uma cepa de *Streptomyces seoulensis*, batizada de SRT 26. Esse isolado apresentou um grande potencial de uso nas lavouras como agente de biocontrole a ser aplicado no manejo de fitonematoides e no manejo de mofo-branco, doença causada pelo fungo *Sclerotinia sclerotiorum* (Bezerra; Monteiro, 2021). Ao analisarem a relação entre actinobactérias e fitonematoides, Park *et al.* (2002) descreveram o parasitismo de *Streptomyces albireticuli* (= *Streptoverticillium albireticuli*) em *Caenorhabditis elegans* após ensaio *in vitro*. Segundo os autores, enzimas produzidas pelas actinobactérias como proteases, quitinases e lipases auxiliam na destruição da cutícula do nematoide e, conseqüentemente, possibilitam seu parasitismo pela bactéria. Esses efeitos foram observados também por Monteiro *et al.* (2022), quando avaliaram nas condições *in vitro*, o efeito de *S. seoulensis* sobre *Meloidogyne* sp., *H. glycines*, *P. brachyurus*, *A. besseyi* e *Helicotylenchus* sp. *S. seoulensis* foi capaz de impedir a eclosão e causar a morte de todos os fitonematoides. Isso demonstra a sua atuação de forma inespecífica sobre os diferentes gêneros, com reduções entre 53% e 100% do número de espécimes vivos, além de provocar alterações nos aspectos morfológicos dos nematoides quando em contato com a bactéria, que causou *lise* do ovo, destruiu o juvenil no seu interior, utilizou o ovo como substrato para crescer e esporular na sua superfície. Visto isso, e de acordo com vários autores, Actinobactérias do gênero *Streptomyces* podem se constituir em uma ótima ferramenta biológica a ser utilizada no manejo de fitonematoides.

Bacillus thuringiensis, espécie conhecida por produzir proteínas com ação inseticida, também tem sido considerado em diversos estudos como potencial agente para o controle de nematoides. As proteínas Cry, produzidas por *B. thuringiensis*, são classificadas em grupos de Cry1 a Cry78, com base em sua identidade de sequência de aminoácidos (Crickmore *et al.*, 2018). Dentre estas, as proteínas Cry com propriedades nematicidas são Cry5, Cry6, Cry12, Cry13, Cry14 e Cry21 (Guo *et al.*, 2008). Esta atividade nematicida pode ser observada também em plantas geneticamente modificadas com capacidade de expressar os genes da proteína Cry5b e Cry6a que reduziram significativamente a capacidade reprodutiva e o número de galhas nas raízes parasitadas por *M. incognita* e *M. hapla* (Yu *et al.*, 2015). Em estudos preliminares, cepas de *B. thuringiensis* demonstraram potencial de biocontrole também contra *A. besseyi* (Liang *et al.*, 2022), o agente etiológico da doença emergente chamada de síndrome-da-haste-verde, que acomete culturas de importância econômica como a soja, algodão e feijão (Meyer *et al.*, 2017). Outra espécie, também do gênero *Bacillus*, que tem se destacado como agente de biocontrole é *B. aryabhatthai*. Assim como as outras espécies já destacadas como nematicidas, esta Rizobactéria forma um biofilme composto por populações microbianas que constituem uma barreira física no sistema radicular que protege as raízes da infecção de patógenos e aumenta a capacidade da planta hospedeira de sobreviver em condições de estresse hídrico (Subramani *et al.*, 2022). Além da bactéria produzir substâncias químicas com ação nematicida como a amônia, cianeto de hidrogênio e quitinases, o biofilme produzido dificulta a penetração dos juvenis infectivos no sistema radicular.

O fungo *Clonostachys rosea*, anteriormente conhecido como *Gliocladium roseum*, é amplamente reconhecido por sua capacidade como micoparásita e antagonista de fungos patogênicos, insetos e nematoides (Ahmed *et al.*, 2014). Certas cepas desse fungo são capazes de atacar nematoides parasitas de plantas diretamente em diversos estágios de vida, como ovos e cistos de *Heterodera glycines* (Iqbal *et al.*, 2018). Além disso, *C. rosea* secreta compostos nematicidas e enzimas proteases e quitinases, os quais, ao entrarem em contato com o nematoide, promovem a degradação da cutícula, resultando na sua morte (Tzelepis *et al.*, 2015). Embora ainda não seja a base de um bionematicida no Brasil, *C. rosea* já confirmou sua eficiência em testes realizados por Gabriel *et al.* (2023a) em condições de casa de vegetação e em nível de campo sobre populações de *H. glycines* em soja cv. M8349. Em casa de vegetação, a aplicação de *C. rosea* no tratamento de sementes resultou na redução de 10,5% no número de J2 no solo + raiz, e 71% no número de cistos viáveis no solo. No campo, esse mesmo tratamento ao final do ciclo da cultura, apresentou redução de J2 no solo + raiz, bem como dos cistos viáveis no solo na ordem de 53,8% e 51%, respectivamente, em relação a testemunha. Diante desses resultados, é afirmativo que *C. rosea* se destaca como uma ferramenta com potencial de eficiência para ser inserido em formulações futuras com foco no manejo de *H. glycines*.

Atualmente, o registro no MAPA inclui mais de 200 produtos comerciais à base de microrganismos agentes de controle biológico incluindo os parasitoides e predadores (AGROFIT, 2023). O processo até a obtenção desse registro é extenso, envolve anos de pesquisa para selecionar espécies e cepas de microrganismos com potencial para o biocontrole, seguidos por testes rigorosos em diferentes ambientes, como *in vitro*, casa de vegetação e campo. Ao final, são emitidos laudos pelo Ministério da Agricultura, Agência da Vigilância Sanitária e Ministério do Meio Ambiente, o que garante que o uso desses produtos não apresente riscos para o ambiente e para a saúde humana, além de confirmar sua eficácia agrônômica. Esse avanço na regulação dos produtos biológicos ao longo dos últimos anos tem assegurado a eficiência e segurança dos bioprodutos disponíveis no

mercado, o que contribui para uma maior confiança por parte dos produtores rurais em relação à sua eficácia no campo.

10.4 Manejo Integrado de Fitonematoides no Cerrado

O desafio representado pela frequente formação de reboleiras devido à presença de fitonematoides e as consequentes perdas de produtividade nas áreas agrícolas do Cerrado são evidentes. A detecção tardia desses patógenos, muitas vezes em densidades populacionais elevadas, aliada a presença de múltiplos gêneros, espécies ou raças de nematoides em uma mesma área, dificultam o seu manejo eficaz nessas regiões (Dias-Arieira *et al.*, 2023). Embora a prevenção da entrada de nematoides seja preferível, uma vez estabelecidos, sua erradicação completa torna-se impraticável. Dado que muitos deles são nativos, a abordagem mais eficaz consiste em manter a densidade populacional em níveis que não causem perdas significativas na produção, através da implementação de estratégias integradas de manejo. A combinação sinérgica das ferramentas de manejo cultural, genético, químico e biológico, tem demonstrado ser a forma mais eficaz de se conviver com esses patógenos (Freitas *et al.*, 2001; Dias-Arieira *et al.*, 2023).

10.4.1 Manejo Cultural

O manejo cultural abrange uma variedade de estratégias dentro dos sistemas agrícolas e pode ser implementado de forma isolada ou combinada. Uma abordagem muito importante é a prevenção da entrada de nematoides em áreas ainda não afetadas e, uma vez presentes, impedir sua propagação para toda a área cultivada. Essa prática envolve diversas ações que devem ser adotadas pelo produtor, como o manejo apropriado do solo, rotação de culturas, uso de plantas antagonistas ou não hospedeiras, e remoção de plantas voluntárias que possam contribuir para a manutenção e reprodução dos nematoides no sistema (Freitas *et al.*, 2001; Dias-Arieira *et al.*, 2023).

O manejo adequado do solo é de grande importância, especialmente em áreas muito infestadas com nematoides fitoparasitas. Melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos não só beneficiam o desenvolvimento das plantas, mas também limita a disseminação e o aumento da densidade populacional desses nematoides. Solos bem estruturados com boa agregação e porosidade, promovem o crescimento radicular das plantas e sua capacidade de absorver água e nutrientes (Nogueira; Manfredi, 1983; Schoenholtz *et al.*, 2000). Por consequência, plantas bem nutridas são mais tolerantes ao ataque de fitonematoides, destacando a importância da fertilidade do solo na luta contra dos nematoides (Oliveira *et al.*, 2023).

A compactação do solo prejudica o desenvolvimento radicular em profundidade porque concentra a maior parte do sistema radicular nos primeiros centímetros do solo, o que resulta no aumento da densidade populacional dos fitonematoides nessa região. Além disso, a compactação reduz a taxa de infiltração de água e aumenta o escoamento superficial, o que pode facilitar a dispersão de ovos e juvenis por toda a área, especialmente em terrenos inclinados (Oliveira *et al.*, 2010). A melhoria dos atributos químicos e físicos do solo pode ser alcançada por meio da adição de matéria orgânica, que, durante a decomposição, libera nutrientes e melhora a agregação do solo, o que contribui para sua estabilidade. Durante esse processo, a matéria orgânica também libera ácidos graxos, compostos fenólicos e nitrogenados com propriedades nematicidas (Oka, 2010). A incorporação de material orgânico no solo pode ser feita através do uso de resíduos agrícolas ou biomassa de plantas cultivadas na área.

Outra estratégia valiosa no manejo cultural é a rotação de culturas, com a utilização de plantas antagonistas ou com baixo potencial de multiplicação dos fitonematoides. Essa prática não apenas reduz a densidade populacional do patógeno, mas também aumenta o estoque de carbono orgânico no solo. Para tanto, é essencial conhecer as espécies de nematoides presentes na área antes de determinar quais plantas serão incluídas no esquema de rotação, pois uma planta com potencial de controle populacional de uma espécie pode multiplicar outras (Freitas *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2022). O objetivo principal dessa estratégia é privar os nematoides de alimento, o essencial para sua reprodução.

Em áreas com a presença de mais de um gênero e/ou espécie de nematoides, a seleção de plantas adequadas para a rotação é desafiadora, mas, de acordo com alguns autores, *C. spectabilis* e *C. breviflora* são as mais recomendadas em áreas com ocorrência dos principais nematoides do sistema soja, milho e algodão. Para os cenários em que a área é infestada por nematoides-das-galhas, nematoide de cistos ou nematoide reniforme, recomenda-se que o plano de rotação inclua o plantio de gramíneas do gênero *Urochloa* (*U. decumbens* e *U. humidicola*). Já no caso de infestação por *P. brachyurus*, diferentes culturas como *Avena sestrova* cv. Embrapa 140, *Canajus cajan* (IAPAR 43) e nabo forrageiro são opções para serem inseridas na rotação de culturas (Ferraz *et al.*, 2010; Souza; Inomoto, 2019; Dias-Arieira *et al.*, 2023).

A eliminação de plantas tigueras, especialmente de culturas como soja, feijão, milho e algodão, é uma medida cultural essencial, pois, o desenvolvimento radicular e a liberação de exsudatos estimulam a eclosão dos ovos dos nematoides, o que pode ocorrer também com as plantas espontâneas suscetíveis aos diferentes gêneros e/ou espécies de nematoides. Portanto, além das tigueras, a remoção de plantas daninhas hospedeiras alternativas de importantes fitonematoides, a exemplo de corda-de-viola, caruru, capim-arroz, angiquinho, erva-de-santa-maria, amendoim-bravo, guanxuma, trapoeraba e tiririca, altamente suscetíveis a *M. incognita* e *M. javanica*; amaranto, azevém, capim-carrapicho, picão-preto e as principais espécies de *Urochloa*, suscetíveis a *P. brachyurus* e *P. zaeae*, e membros da família Fabaceae como a ervilhaca, trevos e mamangá, suscetíveis a *H. glycines*, é crucial para o manejo eficaz desses vermes (Ferraz; Brown, 2016; Dias-Arieira *et al.*, 2023).

10.4.2 Manejo Químico

O manejo químico emprega compostos sintéticos para reduzir, suprimir, eliminar, inativar e inibir a atividade fisiológica dos nematoides. No Brasil, há atualmente 34 nematicidas químicos registrados na base de dados do Agrofit, distribuídos em diversos grupos químicos, tais como Abamectina, Azadiractina, Benfuracarbe, Brometo de metila, Caduzafós, Carbossulfano, Dazomete, Fluazinan, Fluensulfona, Fluopyram, Fostiazato, Metan sódio, PDPH (Peptídio derivado da proteína Harpin) e Terbufós (AGROFIT, 2024). Esses nematicidas químicos podem ser divididos em duas categorias: fumigantes e não-fumigantes (Freitas *et al.*, 2009). Os fumigantes se convertem em gases após a aplicação no solo, enquanto os não-fumigantes consistem em uma variedade de produtos solúveis em água, líquidos ou granulados (Freitas *et al.*, 2009). Exemplos de nematicidas químicos fumigantes incluem Brometo de metila, Metan sódico, Diclopropeno, Cloropicrina e Dazomete, alguns dos quais foram retirados do mercado devido à alta toxicidade e riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Ferraz; Brown, 2016). Os nematicidas não-fumigantes têm alvos fisiológicos específicos. Os Carbamatos (Aldicarbe, Benfuracarbe, Carbofurano, Carbosulfano, Oxamil, Tiodicarbe),

Organofosforados (Cadusafós, Etoprofós, Fenamifós, Fostiazato, Imicyafos, Forato, Terbufós) e Avermectina (Abamectina) são classes de nematicidas químicos que atuam no sistema nervoso, muscular ou respiratório dos nematoides.

Em um estudo conduzido por Nasu *et al.* (2019), foi avaliada a compatibilidade de *P. chlamydosporia* com nematicidas e fungicidas químicos, tais como Abamectina, Tiodicarbe, Fipronil e Carbendazim, comumente empregados nas culturas de soja e algodão. Testes *in vitro* e experimentos em casa de vegetação demonstraram que o tratamento simultâneo de sementes de soja com fungicidas e nematicidas não comprometeu a viabilidade nem os mecanismos de ação de *P. chlamydosporia* no parasitismo de ovos e juvenis de *M. incognita*. Em outro bioensaio também realizado em condições *in vitro*, utilizando sementes de tomate para avaliar a compatibilidade de *P. chlamydosporia* com inseticidas no controle de *M. incognita*, os resultados indicaram que os princípios ativos não inibiram a germinação dos clamidósporos. No entanto, reduziram a capacidade de crescimento do fungo no meio de cultura (Carvalho *et al.*, 2022). Portanto, é essencial avaliar a compatibilidade entre defensivos químicos e biológicos para garantir a eficiência no controle da densidade populacional do nematoide.

10.4.3 Outras substâncias

Como uma forma alternativa ao uso dos nematicidas químicos, pesquisas veem sendo realizadas com o objetivo de avaliar o potencial de plantas e/ou seus resíduos, a exemplo de extratos e óleos essenciais, resíduos como tortas, dejetos, caldas, etc., quitina e terpenos, oriundos das atividades agrícolas, na mortalidade de fitonematoides. A torta de mamona possui um grande potencial em suprimir os fitonematoides devido a presença da ricina, proteína altamente tóxica, presente nas sementes (Miranda; Miranda, 2019). Moreira (2015) ao avaliarem o efeito de diferentes óleos essenciais, observaram a redução de 29 a 83 % na taxa reprodutiva do *M. incognita* raça 2, em plantas de tomate. Gonçalves *et al.* (2016) ao testarem diferentes doses de óleo essencial de eucalipto nas condições *in vitro*, observaram uma redução de até 90% na população do *M. javanica*.

A técnica de pirólise é uma inovação que vem sendo difundida nos últimos anos, com o objetivo de aproveitar todo tipo de resíduo, ao mesmo tempo que se gera energia. Nesse processo, o resíduo, por ser submetido a altas temperaturas em ambiente desprovido de oxigênio, sofre a decomposição (Lehmann; Joseph, 2009; Cabeza *et al.*, 2018), liberando gases que formam o extrato pirolenhoso, e o produto final é chamado de biocarvão ou “biochar” (Sohi *et al.*, 2010). Nas duas últimas décadas, estudos utilizando o extrato pirolenhoso e o biocarvão, provenientes de uma grande diversidade de resíduos foram realizados, mostrando que o biocarvão contribuiu para composição e a abundância da comunidade biológica no solo (Kin *et al.* (2007); JIN (2010)). Um dos exemplos é o estudo de Zhang *et al.* (2013), que observaram o aumento na população de nematoides onívoros, micófitos e bacteriófitos, e redução na diversidade e população dos fitonematoides. Os estudos do extrato pirolenhoso no manejo de fitonematoides são recentes, e se encontram nos estágios de testes *in vitro*. Sadiku *et al.* (2023) ao utilizarem o extrato pirolenhoso de *Bambusa vulgares* em alface após a inoculação de nematoide das galhas, observaram um maior incremento na produtividade e o efeito nematicida comparado com a testemunha e o controle químico. A grande diversidade de resíduos e matérias vegetais que podem ser transformados em biocarvão e a obtenção do extrato pirolenhoso, é uma oportunidade de se obter novos compostos para o manejo de fitonematoides.

10.4.4 Manejo Genético

O manejo genético implica na utilização de plantas com resistência genética, onde mecanismos de controle interferem no estabelecimento ou diminuem o desenvolvimento dos nematoides. Cultivares resistentes, moderadamente resistentes ou tolerantes têm sido preferidas em áreas afetadas por esses patógenos (Dias-Arieira *et al.*, 2023). A resistência ocorre quando a planta impede a multiplicação dos nematoides em suas raízes, limitando-se a um grupo específico de nematoides endo ou semiparasitas sedentários (Ferraz; Brow, 2016). A tolerância refere-se à capacidade de uma planta de superar os danos causados pelos nematoides, mantendo uma produtividade satisfatória. A tolerância não está relacionada à resistência, mas sim, ao desenvolvimento da planta e à sua capacidade de compensar os danos causados pelos nematoides, independentemente do fator de reprodução. A cultivar ideal deve possuir ambas as características (Ferraz; Brow, 2016). A escolha entre resistência ou moderada resistência depende da capacidade da planta de reduzir ou limitar, em maior ou menor grau, uma espécie específica de nematoide (Dias-Arieira *et al.*, 2023). A utilização de cultivares resistentes em áreas infestadas visa diminuir a população de nematoides. No entanto, é essencial considerar a resistência específica da cultivar aos gêneros, espécies ou raças de nematoides presentes. Alternar entre cultivares resistentes e tolerantes pode ser necessário para evitar o desenvolvimento de indivíduos resistentes e garantir a eficácia contínua da cultivar (Silva, 2001; Ferraz; Brow, 2016).

Mecanismos de resistência podem envolver a impedimento ou repulsão dos nematoides durante a penetração ou alimentação no sistema radicular. A resistência pode ser atribuída a efeitos repelentes ou nematicidas de substâncias nos exsudatos radiculares. Outras características incluem incompatibilidade e regulação gênica após a penetração do nematoide. Mecanismos de hipersensibilidade, expressão de genes, síntese de m-RNA e transcrição de DNA desempenham um papel na resistência (Silva, 2001). Além de seu significado econômico fundamental para o agronegócio, a cultura da soja destaca-se por apresentar a maior diversidade de cultivares resistentes às espécies de *Meloidogyne* sp. e *H. glycines*. Araújo *et al.* (2012), ao empregarem uma variedade de soja resistente ao nematoide das galhas (BRS 282), constataram uma redução no fator de reprodução após 60 dias da semeadura. No mesmo estudo, verificou-se que o tratamento das sementes com controle químico ou manejo biológico contribuiu para o crescimento das plantas.

10.4.5 Controle Biológico

O solo serve como habitat natural para uma variedade de microrganismos que desempenham diversas funções na sua ecologia. Nos últimos anos, houve um aumento significativo na utilização de produtos biológicos para controlar nematoides fitoparasitas, os quais incluem inimigos naturais de várias classes de microrganismos considerados uma alternativa segura e benéfica. Bactérias e fungos são os microrganismos mais comumente empregados no manejo de doenças radiculares causadas por nematoides (Carneiro, 1992; Ferraz; Brown, 2016). Fungos podem parasitar, preda nematoides ou produzir metabólitos tóxicos. Entre os fungos, os nematófagos são classificados como parasitas facultativos ou obrigatórios. Fungos como *T. harzianum*, *P. lilacinum*, *P. chlamydosporia* e *C. rosea* têm demonstrado eficácia no manejo de nematoides parasitas de plantas (Soares *et al.*, 2017). Bactérias também desempenham um papel crucial no controle biológico de fitonematoides. Bactérias do gênero *Bacillus*, especialmente *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. licheniformis*, são utilizadas para competir por espaço e nutrientes,

produzindo substâncias que interferem no ciclo de vida do nematoide. Outras bactérias, como *Pasteuria*, são parasitas obrigatórias que reduzem a taxa de infecção no sistema radicular dos nematoides (Ferraz; Brown, 2016; Soares *et al.*, 2017).

O sucesso do manejo biológico depende das estratégias adotadas. O manejo adequado do solo, com o incremento da matéria orgânica por meio de plantas de cobertura, pode ser aprimorado. A combinação do manejo genético com nematicidas químicos é fundamental desde o estágio inicial do desenvolvimento radicular até a colonização benéfica por fungos e bactérias.

10.5 Importância do controle biológico no manejo integrado de nematoides

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de produtos biológicos, e isto se deve a gigantesca produção agrícola nesse país de extensão continental e das suas condições climáticas. No Cerrado, já é sabido que a agricultura enfrenta desafios específicos decorrentes da presença de fitonematoides, que representam uma grande ameaça à produtividade das culturas. Portanto, o seu manejo adequado é essencial para garantir a sustentabilidade e produtividade das lavouras. Diante dessa necessidade, o Manejo Integrado de Nematoides (MIN) surge como uma abordagem holística, que combina diversas práticas na convivência com esses patógenos e que incorpora estratégias baseadas no manejo cultural, genético, químico e, de maneira crucial, o manejo biológico.

O manejo biológico é uma prática fundamental no MIN, o qual utiliza microrganismos para reduzir as populações de nematoides parasitas e minimizar a dependência de pesticidas químicos. Bactérias como *Bacillus methylotrophicus*, *B. firmus*, *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. pumilus*, *B. paralicheniformis*, *B. thuringiensis*, e as espécies *Pasteuria nishizawae* e *Pseudomonas oryzihabitans*, juntamente com fungos como *P. lilacinum*, *P. chlamydosporia*, *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. endophyticum* e *T. koningiopsis* são os bioagentes disponíveis no Brasil para esse fim (AGROFIT, 2023). Esses microrganismos atuam naturalmente através de uma variedade de mecanismos, como a produção de enzimas e metabólitos tóxicos, antibiose, comensalismo e indução de resistência (Bedendo *et al.*, 2011). Por exemplo, fungos como *P. lilacinum* e *P. chlamydosporia* parasitam ovos e fêmeas de nematoides, ao mesmo tempo em que induzem resistência e promovem o crescimento das plantas (Zavala-Gonzalez *et al.*, 2015; Shahriyar; Monjil, 2019).

A principal importância do manejo biológico de nematoides reside na sua integração com outras ferramentas dentro de um esquema de manejo integrado. A sua combinação com as práticas culturais, genéticas e químicas, tem mostrado resultados satisfatórios na redução populacional de fitonematoides, superando algumas limitações de quando essas práticas são aplicadas isoladamente. A exemplo, podemos citar a inexistência de cultivares resistentes com alta produtividade, ou que seja resistente a mais de um gênero e/ou espécie de nematoide; a não disponibilidade de cultivares resistentes a alguns gêneros de importância econômica; e o número limitado de princípios ativos registrados para o controle químico.

A rotação de culturas e uso diversificado de plantas de cobertura são estratégias com as quais o manejo biológico pode ser combinado, e sua eficiência já foi comprovada em alguns resultados de pesquisa. Soares *et al.* (2022), ao avaliarem o efeito da palhada de aveia-branca, brachiaria e milheto, associadas ao tratamento de sementes de soja com *P. lilacinum* e *T. harzianum* em dois ensaios de campo, obtiveram, respectivamente,

redução de 44% a 68%, e 50% a 73% na reprodução de *M. javanica*, quando comparada ao tratamento sem manejo biológico. Em condições controladas, Dias-Arieira *et al.* (2023) obtiveram redução na reprodução de *M. javanica* na soja tratada com *B. subtilis* e *B. licheniformis* na ordem de 30%, 79% e 86% quando esta foi cultivada após milho, *C. spectabilis* e *C. ochroleuca*, respectivamente, em comparação com o tratamento sem as bactérias. Em outro ensaio, os mesmos autores observaram 91% na redução de *M. javanica* em soja tratada com *P. chlamydosporia* e cultivada após o mix de cobertura com crumbe, nabo forrageiro, milho, trigo-mourisco, *C. ochroleuca* e capim-coraçana, quando comparada a soja cultivada sem o tratamento biológico. Resultados encontrados por Costa *et al.* (2014), demonstraram que *C. spectabilis*, quando tratada com *B. subtilis*, apresentou redução de 88% na população de *P. brachyurus* por grama de raiz.

O manejo genético envolve a seleção e utilização de variedades de plantas resistentes aos nematoides, e essa ferramenta pode ser incorporada no planejamento de rotação de culturas. Esse manejo pode servir de proteção ao ataque desses patógenos, e a sua integração com o manejo biológico também tem apresentado efeito aditivo na redução populacional de nematoides. Um exemplo de sucesso dessa combinação, é a redução de 92% da população de *H. glycines* em soja resistente e tratada com *P. lilacinum* em relação a testemunha sem o tratamento (Dias-Arieira *et al.*, 2023).

Com relação ao manejo químico, o seu uso não é desaconselhado em situações críticas de altas infestações por fitonematoides. No entanto, quando utilizado de forma isolada, tem se observado que este método apresenta desvantagens relacionadas ao efeito efêmero das moléculas químicas que pode cessar muito antes do término do ciclo da cultura, evidenciando uma aceleração na multiplicação dos nematoides. O método químico, combinado ao manejo biológico, pode promover melhorias no sistema relacionadas a redução populacional conforme observado por Dias-Arieira *et al.* (2023) que ao testarem abamectina e *P. nishizawae*, obtiveram redução no fator de reprodução (FR) de *H. glycines* na ordem de 91% quando comparado ao uso da abamectina de modo isolado, obtendo uma redução de 85%.

A tecnologia de aplicação é a base da garantia da distribuição eficaz dos agentes biológicos no solo, e consequentemente, desempenha um papel crucial no sucesso do uso de produtos biológicos no manejo de fitonematoides. Diferentes métodos, como a aplicação no sulco durante o plantio e aplicação via tratamento de sementes (TS), são utilizados com resultados promissores em estudos que destacam a importância da combinação dessas duas formas de aplicação. A escolha do método depende das características do agente biológico e da disponibilidade da tecnologia de aplicação pelo produtor.

Em trabalhos desenvolvidos pela equipe de nematologistas da JCO Bioprodutos nas safras 2021/2022 e 2022/2023, tratamentos onde microrganismos foram simultaneamente adicionados no tratamento de sementes (TS) e no sulco de plantio em comparação com microrganismos aplicados apenas no TS, e analisado a população de *P. brachyurus* aos 30 dias após a germinação e na fase da floração, observou-se um maior aumento populacional desse nematoide da fase dos 30 DAE para floração, na ordem de 63% e 38%, na safra 21/22 e 22/23, respectivamente, quando o microrganismo foi adicionado apenas no TS. Já o tratamento em que o microrganismo foi aplicado no TS e no sulco, além de menor aumento (10% e 15% nas duas safras mencionadas acima), este tratamento teve o maior rendimento de produtividade com incremento de 17% e 22%, respectivamente, mostrando que, além do TS, a adição de microrganismos no sulco, eleva a eficiência de microrganismos no manejo de nematoides, culminando com a melhor performance da cultura (Monteiro *et al.*, 2023). Essas abordagens integradas e estratégias

combinadas oferecem boas perspectivas para o manejo de nematoides no Cerrado, visando a sustentabilidade e produtividade duradoura nas lavouras.

10.6 Considerações finais

Com base na discussão desenvolvida neste capítulo, pode-se afirmar que o Cerrado enfrenta diversos desafios no manejo agrícola, especialmente quando se trata dos nematoides, e que esses organismos microscópicos, muitas vezes negligenciados, desempenham um importante papel na complexa teia das interações do solo, ao mesmo tempo que a sua presença pode representar uma ameaça considerável para as culturas agrícolas nessas regiões. Além disso, existe o agravante do clima característico com períodos secos e úmidos distintos, que proporcionam um ótimo ambiente para o seu desenvolvimento e reprodução, o que torna essas áreas particularmente suscetíveis a infestações por diversos gêneros e/ou espécies, que na maioria das vezes coexistem, dificultando ainda mais o manejo eficaz por parte dos agricultores.

Nesse cenário desafiador, dos princípios fitopatológicos de controle de doenças de plantas, o controle biológico emergiu nos últimos anos como uma abordagem para ser aplicada com foco em manejo integrado dos nematoides, que incluem os métodos de controle genético, cultural e químico, que se utilizados de forma conjunta, é possível alcançar resultados sólidos. Em outras palavras, o manejo de fitonematoides não se limita a uma abordagem única, mas sim à adoção de um conjunto de boas práticas agronômicas. O objetivo é manter as populações de nematoides abaixo do limiar de dano econômico, elevando a produtividade da cultura sem comprometer o meio ambiente, além de estabelecer uma coexistência econômica com esses patógenos.

A introdução no sistema, de agentes de biocontrole específicos para combater os fitonematoides, a exemplo dos fungos nematófagos e bactérias benéficas que auxiliam, não só, na redução das populações de nematoides fitoparasitas, mas também trazem benefícios para as plantas sem causar danos ao meio ambiente, é sem dúvidas uma solução sustentável e eficaz na mitigação de problemas agrícolas decorrentes da presença desses fitopatógenos. Em adição, a impossibilidade praticamente total de erradicação dos nematoides em áreas infestadas, destaca a importância da compreensão aprofundada das características biológicas dos nematoides presentes no Cerrado, que é essencial para desenvolver estratégias de controle biológico mais precisas e eficientes, e isso envolve a identificação dos gêneros e/ou espécies envolvidos, seus padrões de ocorrência, biologia, patogenicidade, formas de dispersão, sobrevivência e ciclo de hospedeiros.

Os dados de ocorrência de nematoides apresentados neste capítulo, evidenciou que, na maioria dos casos, ocorrem misturas de gêneros e/ou espécies, sublinhando e comprovando a complexidade das interações entre fitonematoides e as culturas agrícolas nas lavouras brasileiras. Além disso, refletem a necessidade de uma abordagem integrada, que vai além da simples identificação de fitonematoides, considerando também fatores como densidade populacional, distribuição espacial e variações sazonais de cada um deles. A análise detalhada dos diferentes gêneros e espécies, suas incidências e variações nas densidades populacionais ao longo do tempo, enfatiza a importância crítica do monitoramento regular e contínuo, que se coloca como ferramenta estratégica fundamental para a tomada de decisões de manejo, por ser capaz não só, de identificar precocemente mudanças nas populações de fitonematoides, mas também, por permitir que os agricultores ajustem suas práticas de manejo de acordo com as condições específicas de suas lavouras, implementando de modo proativo estratégias adaptativas e

personalizadas para minimizar os potenciais danos às culturas de modo eficiente, contribuindo para a preservação da saúde do solo e a sustentabilidade a longo prazo da agricultura brasileira.

Referências

- AGROFIT. **Consulta Aberta de Agrotóxicos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumosagropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/agrofit>. Acesso em: 15 out. 2023.
- AHMED, M.; LAING, M. D.; NS AHLAI, I. V. *A new control strategy for nematodes of sheep using chlamydo spores of a fungus, Clonostachys rosea f. rosea, and an ethanolic extract of a plant, Ananas comosus*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 24, n. 8, p. 860-871, 2014.
- ARAÚJO, F. F. Controle genético, químico e biológico de meloidoginose na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p.220-224, 2012.
- ASMUS, G. L.; CECCON, G.; INOMOTO, M. M.; COMUNELLO, E. *Tylenchorhynchus* sp. associado a danos cultura da soja. **38.º Congresso Brasileiro de Nematologia**, Cuiabá – MT, Brasil, 2023.
- ATOLANI, O.; FABIYI, O. A. **Plant parasitic nematodes management through natural products: current progress and challenges**. Management of phytonematodes: recent advances and future challenges, p. 297-315, 2020.
- BEDENDO, I. P.; MASSOLA JUNIOR, N. S.; AMORIM, L. Controles cultura, físico e biológico de doenças de plantas. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (Ed). **Manual de Fitopatologia: princípios e conceitos**. 4. ed. Piracicaba: Ceres, v.1, p.367-388, 2011.
- BETTIOL, W. *et al.* **Produtos Comerciais à Base de Agentes de Biocontrole de Doenças de Plantas**. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP). 156p., 2012.
- BETTIOL, W. *et al.* Produtos comerciais à base de *Trichoderma*. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (Org.). **Trichoderma: Uso na Agricultura**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2019.
- BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009.
- BEZERRA, A. C. C.; MONTEIRO, J. M. S. M. Actinobactérias Aplicadas ao Manejo de Nematoides. In: AMARAL., L. S.; ARAÚJO, E. O. **Biocontrole de Fitonematoides: Atualidades e Perspectivas**. Ed. Dialética - SP, 2021.
- CABEZA, I. *et al.* Effect of biochar produced from different biomass sources and at different process temperatures on methane production and ammonia concentrations in vitro. **Animal Feed Science and Technology**. v.237, p.1-7, 2018.
- CARVALHO, R. P. *et al.* Effects of commercial pesticides on the nematode biological control agent *Pochonia chlamydosporia*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 32, n. 10, p. 1220-1231, 2022.
- CARNEIRO, R. M. D. G. Princípios e tendências do controle biológico de nematoides com fungos nematófagos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, p.113-121, 1992.

-
- CHITWOOD, D. J. Phytochemical based strategies for nematode control. **Annual Review of Phytopathology**. v.40, p.221-249, 2002.
- COSTA, M. J. N.; PASQUALLI, R. M.; PREVEDELLO, R. Effect of soil organic matter content, cover crop and planting system on the control of *Pratylenchus brachyurus* in soybean. **Summa phytopathol.** 40 (1), 2014.
- CRICKMORE, N. *et al.* **Bacillus thuringiensis toxin nomenclature**. 2018. Disponível em: <http://www.btnomenclature.info/>. Acesso em: 22 set. 2018.
- DIAS-ARIEIRA, C. R.; ARAUJO, F. G.; MACHADO, A. C. Z. **Manejo de nematoides em grandes culturas**. In: DIAS-ARIEIRA, C. R.; MIAMOTO, A.; MACHADO, A. C. Z. Manejo integrado de nematoides. Piracicaba: NPCT, 2023. p.229-237.
- DIAS-ARIEIRA, C. R.; MIAMOTO, A.; MACHADO, A. C. Z. Manejo integrado de nematoides. In: DIAS-ARIEIRA, C. R.; ARAUJO, F. G.; MACHADO, A. C. Z. **Manejo de nematoides em grandes culturas**. Piracicaba, NPCT, P. 229-237, 2023.
- EL-ABYAD, M. S. *et al.* Towards the biological control of fungal and bacterial diseases of tomato using antagonistic *Streptomyces* spp. **Plant and soil**, v. 149, n. 2, p. 185-195, 1993.
- EISENHAUER, N. *et al.* Nematicide impacts on nematodes and feedbacks on plant productivity in a plant diversity gradient. **Acta Oecologica**, v. 36, n. 5, p. 477-483, 2010.
- EL-NAGDI, W. M. A.; ABD-EL-KHAIR, H. Application of *Bacillus* species for controlling root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in eggplant. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 43, p. 1-10, 2019.
- FAGERIA, N. K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.42(16), p. 2063-2113. 2012.
- FARIAS, S. P. In vitro and in vivo control of yam dry rot nematodes using pyroligneous extracts from palm trees. **Revista Ceres**, v. 67, n.6, p.482-490, 2020.
- FERRAZ, L. C. C. B. Nematoides. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (Ed.). **Manual de Fitopatologia: princípios e conceitos**. Minas Gerais: Ceres, 2018. V. 1, cap. 13, p. 195-211.
- FERRAZ, S.; FREITAS, L.G; LOPES, E.A.; DIAS-ARIEIRA, C.R. **Manejo Sustentável de Fitonematoides**. Editora UFV, 304p, 2010.
- FERRAZ; L. C. C. B.; BROWN, D. J. F. Nematologia de plantas: fundamentos e importância. In: FERRAZ; L. C. C. B.; BROWN, D. J. F. **O manejo integrado dos fitonematoides**. Manaus: Norma Editora, 2016. p.182-233.
- FONTES, E. M. G., VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. 2020. 514 p.
- FORTES, M. Q. **Efeito da época e da profundidade de coleta do solo e raiz da soja na quantificação da população de *Meloidogyne incognita***. 2021. 29 f. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Barra do Garças, 2021.
- FREITAS, L. G.; LIMA, R. D.; FERRAZ, S. **Introdução a nematologia**. Viçosa: UFV, 2001. 90p.

-
- GOULART, A. M. C. **Diversidade de nematoides em agroecossistemas e ecossistemas naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.
- GRIGOLLI, J. F. J.; ASMUS, G. L. **Manejo de nematoides na cultura da soja**. Circular Técnica, v. 1, p. 1-19, 2014.
- GUO, S. *et al.* New strategy for isolating novel nematicidal Crystal protein genes from *Bacillus thuringiensis* strain YBT - 1518. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 74, n. 22, p. 6997 - 7001, 2008.
- HAMOUDA, R.; AL-SAMAN, M.; EL-ANSARY, M. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis* on suppressing root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infecting banana plants under greenhouse conditions. **Egyptian Journal of Agronomy**, v. 18, n. 2, p. 90-102, 2019.
- HANDOO, Z. A.; PALOMARES-RIUS, J. E.; CANTALAPIEDRA-NAVARRETE, C.; LIÉBANAS, G.; SUBBOTIN, S. A.; CASTILLO, P. Integrative taxonomy of the stunt nematodes of the genera *Bitylenchus* and *Tylenchorhynchus* (Nematoda, Telotylenchidae) with description of two new species and a molecular phylogeny. **Zoological Journal of the Linnean Society**, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/zoj.12175>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- GABRIEL, M.; ARRUDA, F. V. F.; SILVA, J. V. C. L. *et al.* Potencial de biocontrole de fitonematoides por *Meyerozyma guilliermondii*. **Anais do 37.º Congresso Brasileiro de Nematologia**, Ribeirão Preto - SP, Brasil, 2022.
- GABRIEL, M.; MONTEIRO, J. M. S.; BEZERRA, A. C. C. *et al.* Microalga no controle de *Meloidogyne javanica* (TREUB, 1985) CHITWOOD, 1949. **Anais do 17.º Simpósio de Controle Biológico & 2.º Simpósio Latino-Americano de Controle Biológico**, Juazeiro - BA / Petrolina - PE, Brasil, 2023a.
- GABRIEL, M.; MONTEIRO, J. M. S.; ANJOS, S. O. *et al.* Eficiência de biocontrole de *Clonostachys rosea* sobre *Heterodera glycines*. **Anais do 38.º Congresso Brasileiro de Nematologia**, Cuiabá – MT, Brasil, 2023b.
- GONÇALVES, A.O. *et al.* **Efeito nematicida de óleo essencial de eucalipto sobre nematoide das galhas**. 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/seagro/article/view/17364/19402>. Acesso em: 06 mar. 2024.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Mapa de vegetação do Brasil**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/>. Acesso em: 14 out. 2023.
- IQBAL, M. *et al.* Evaluation of *Clonostachys rosea* for control of plant-parasitic nematodes in soil and in roots of carrot and wheat. **Phytopathology**, v. 108, n. 1, p. 52-59, 2018.
- JIN, H. **Characterization of microbial life colonizing biochar and biocharamended soils**. PhD Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY. 2010.
- JONES, J. T. *et al.* Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. **Molecular plant pathology**, v. 14, n. 9, p. 946-961, 2013.
- KARAJEH, M. R. Efficacy of *Saccharomyces cerevisiae* on controlling the root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infection and promoting cucumber growth and yield under laboratory and field conditions. **Archives of Phytopathology and Plant Protection**, v. 46, n. 20, p. 2492-2500, 2013.

KAURA, T.; JASROTIAB, S.; OHRIB, P.; MANHAS, R. K. Evaluation of in vitro and in vivo nematocidal potential of a multifunctional streptomycete, *Streptomyces hydrogenans* strain DH16 against *Meloidogyne incognita*. **Microbiological Research**, v. 192, p. 247-252, 2016.

KIM, J. S. *et al.* Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. **Soil Biology and Biochemistry** 39, 648-690, 2007.

KUMAR, K. K.; DARA, S. K. Fungal and bacterial endophytes as microbial control agents for plant-parasitic nematodes. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 8, p. 4269, 2021.

LACATENA, F. *et al.* Chlamyphilone, a novel *Pochonia* chlamydosporia metabolite with insecticidal activity. **Molecules**, v. 24, n. 4, p. 750, 2019.

LAZAROVA, S.; COYNE, D.; RODRIGUEZ, M. G. *et al.* Functional diversity of soil nematodes in relation to the impact of agriculture—a review. **Diversity**, v. 13, n. 2, p. 64, 2021.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. 2009. Biochar for environmental management: na introduction. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management: **Science and Technology**. Earthscan, London, pp. 1-12.

LIANG, Z. *et al.* Toxicity of *Bacillus thuringiensis* strains derived from the novel crystal protein cry31aa with high nematocidal activity against rice parasitic nematode *Aphelenchoides besseyi*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 15, p. 8189, 2022.

LUND, M. E.; MOURTZINIS, S.; CONLEY, S. P. *et al.* Soybean cyst nematode control with *Pasteuria nishizawae* under different management practices. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2534-2540, 2018.

MACHADO, A. C. Z. Current nematode threats to Brazilian agriculture. **Current Agricult. Sci. And Technol.** 2014; 20:26–35. 2.

MACHADO, A. C. Z.; AMARO, P. M. SILVA, S. A. D. Two novel potential pathogens for soybean. PLOS ONE 14(8): 0221416. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221416>. Acesso em: 13 jan. 2024.

MATTOS, V. S. *et al.* *Meloidogyne* spp. populations from native Cerrado and soybean cultivated areas: genetic variability and aggressiveness. **Nematology**, v. 18, n. 5, p. 505-515, 2016.

MEYER, M. C.; FAVORETO, L.; KLEPKER, D. *et al.* Soybean green stem and foliar retention syndrome caused by *Aphelenchoides besseyi*. **Tropical Plant Pathology**, v. 42, p. 403-409, 2017.

MICOLA, J. Effect of microbivore species composition and basal resource enrichment on trophic level biomasses in an experimental microbial based soil food web. **Oecologia**, v. 117, n. 3, p. 396-403, 1998.

MICOLA, J.; SETALA, H. No evidence of trophic cascades in na experimental microbial based soil food web. **Ecology**, v. 79, n. 1, p. 153-164, 1998.

MIRANDA, L. L. D.; MIRANDA I. D. **Nematoides**. FMC, 52p. 2019

MOENS, M.; PERRY, R. N.; STAR, J. L. *Meloidogyne species* – a diverse group of novel and importante plant parasites. *In*: MOENS, M.; PERRY R. N.; STAR, J. L. Editors. **Root-knot nematodes**. Wallingford: CABI International; 2010. pp.1–13. 3.

-
- MONTEIRO, J. M. S.; BEZERRA, A. C. C.; SILVA, J. V. C. L. *et al.* Potencial de biocontrole de fitonematoides por *Streptomyces seoulensis*. **Anais do 37. Congresso Brasileiro de Nematologia**, Ribeirão Preto - SP, Brasil, 2022.
- MONTEIRO, J. M. S.; GABRIEL, M.; ARRUDA, F. V. F.; CALDAS, A. C.; OLIVEIRA, J. C. Efeito do modo de uso de ativos biológicos sobre a população de *Pratylenchus brachyurus* na soja. **Anais do 38. Congresso Brasileiro de Nematologia**, Cuibá – MT, Brasil, 2023.
- MOREIRA, F. J. C. Controle alternativo de nematoides das galhas (*Meloidogyne incognita*) raça 2, com óleos essenciais no solo. **Summa Phytopathologica**, v.41, n.3, p.207-213, 2015.
- NASU, E. G. C. *et al.* Pesticides on the viability of *Pochonia chlamydosporia* for controlling *Meloidogyne incognita*. **Australasian Plant Pathology**, v. 48, p. 331-338, 2019.
- NILES, R. K.; FRECKMAN, D. W. From the ground up: nematodes Ecology in bioassessment and ecosystem health. *In*: BARTELS, J. M. (Ed.). **Plant and nematode interactions**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1998. cap. 4, p. 65-85.
- NOGUEIRA, S. S. S.; MANFREDINI, S. **Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja**. Campina Grande-PB: Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.18, n. 9, p. 973-976, 1983.
- OKA, Y. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments – a review. **Applied Soil Ecology**, v. 44, n.1, p.101-115, 2010.
- OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. A.; CURI, N. Erosão hídrica em estradas florestais: causas e controle. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 27, n. 2, p.126-139, 2010.
- OLIVEIRA, G. F.; MARQUES, M. L. S.; RODRIGUES, K. D. N. *et al.* **Atributos da fertilidade do solo e a ocorrência de nematoides na cultura da soja**. Research, Society and Development, v. 12, n. 1. 2023.
- PAIM, R. C. C.; ASSUNÇÃO, G. M. de. Panorama do Agronegócio Exportador Brasileiro. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 7, p. e473642, 2023.
- PERES, A. R. I. **Influência do estágio fenológico da soja e da profundidade de coleta das amostras na quantificação da população de *Pratylenchus brachyurus***. 2021. 30 f. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Barra do Garças, 2021.
- PIMENTEL, R. R. *et al.* Hospedabilidade de plantas do Bioma Cerrado a *Meloidogyne* spp. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 705-724, 2021.
- PORTILHO, N. E. F. Efeito do estágio fenológico da soja e da profundidade de coleta do solo e raiz na quantificação da população de *Heterodera glycine*. 2021. 34 f. **Monografia (Bacharelado em Agronomia)** – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Barra do Garças, 2021.
- POVEDA, J.; ABRIL-URIAS, P.; ESCOBAR, C. Biological control of plant-parasitic nematodes by filamentous fungi inducers of resistance: *Trichoderma*, mycorrhizal and endophytic fungi. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 992, 2020.

- SADIKU, N.A. *et al.* Nematicidal activity of pyrolisate of *Bambusa vulgaris* on root-knot Nematode; *Meloidogyne incognita* of lettuce. **Pakistan Journal of Nematology**, v.41(2), p.70-181, 2023.
- SAMAC, Deborah A.; KINKEL, Linda L. Suppression of the root-lesion nematode (*Pratylenchus penetrans*) in alfalfa (*Medicago sativa*) by *Streptomyces* spp. **Plant and Soil**, v. 235, n. 1, p. 35-44, 2001.
- SAMPAIO E. G. Pyroligneous extract in the control of *Meloidogyne enterlobii* in guava plants cv. Paluma. **Revista de Ciências Agrárias** (Portugal), v.45, n.3, p.136-143, 2022.
- SANTANA, C. A. M. *et al.* In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, v. 1, cap. 5, p. 141-19, 2020.
- SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T. *et al.* Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.6, n.3, p.474-482, 2011.
- SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Wageningen, v.138, p.335-356, 2000.
- SHAHRIYAR, A.; MONJIL, M. S. Effect of *Paecilomyces lilacinus* on tomato plants and the management of root knot nematodes. **Journal of the Bangladesh Agricultural University**, 17(1), 9-13, 2019.
- SILVA, J. C. P.; TERRA, W. C.; BARROS, A. F. *et al.* **Compostos orgânicos voláteis no controle de fitonematoides**. Lavras: Ed. UFLA, 2019.
- SILVA, J.F.V. Resistência genética da soja a nematoides do gênero *Meloidogyne*. In: SILVA, J. F. V.; MAZAFFERA, P.; CARNEIRO, R. G.; ASMUS, G. L.; FERRAZ, L. C. C. B. **Relações parasito-hospedeiro nas meloidoginoses da soja**. Londrina: Embrapa Soja. Sociedade de Nematologia, 2001. 127p.
- SILVA, R. G.; PACHECO, L. P.; ONO, F. B. *et al.* **Sucessão e rotação de cultura com calagem superficial sobre o manejo de nematoides e a produtividade de soja**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.57, e02695, 2022.
- SILVA J. F. V. Um histórico. In: SILVA, J. F. V. (Ed.). **O nematoide de cisto da soja: a experiência brasileira**. Sociedade Brasileira de Nematologia; 1999. pp. 15–23.
- SOARES, P. L. M.; NASCIMENTO, D. D.; VIDAL, R. L. *et al.* Controle biológico de nematoides. In: BALDIN, E. L. L.; KRONKA, A. Z.; SILVA, I. F. (Org.). **Inovações em Manejo Fitossanitário**. Botucatu, SP: FEPAF, 2017, v. 1, p. 167-189.
- SOARES, T. S.; GARCIA, L. E. S.; MIAMOTO, A. *et al.* Combined use of green manure and biological agents to control *Meloidogyne javanica* (treub) Chtwood in soybean. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n.8.p. 50-58, 2022.
- SOHI, S. P. *et al.* Chapter 2 - A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. In: DONALD, L. S. (Ed.). **Advances in Agronomy: Academic Press**, v. 105, p.47-82. 2010.
- SOUZA, V. H. M.; INOMOTO, M. M. **Host suitability of grain sorghum and sudangrass for *Pratylenchus brachyurus***. Arquivos do Instituto Biológico, v. 86, p. 1-4, 2019.

-
- SUBRAMANI, A. K. *et al.* A marine chitinase from *Bacillus aryabhatai* with antifungal activity and broad specificity toward crystalline chitin degradation. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 52, n. 10, p. 1160-1172, 2022.
- SYNGENTA; AGROCONSULT; SOCIEDADE BRASILEIRA DE NEMATOLOGIA. **Pesquisa inédita revela mapa de crescimento e danos econômicos causados por nematoides e doenças iniciais nas principais culturas no Brasil.** Disponível em: <https://www.syngenta.com.br/press-release/institucional/pesquisa-inedita-revela-mapa-de-crescimento-e-danos-economicos-causados>. Acesso em: 23 dez. 2023.
- TROFYMOW, J. A.; COLEMAN, D. C. The role of bacterivorous and fungivorous nematodes in cellulose and chitin decomposition in the context of a root/rhizosphere/soil conceptual model. In: FRECKMAN, D. W. (Ed.). **Nematodes in soil ecosystems**. Austin; University of Texas Press, 1982.
- TZELEPIS, G.; DUBEY, M.; JENSEN, D. F.; KARLSSON, M. Identifying glycoside hydrolase family 18 genes in the mycoparasitic fungal species *Clonostachys rosea*. **Microbiology**, v. 161, n. Pt_7, p. 1407-1419, 2015.
- WARDLE, D. A.; YEATES, G. W. The dual importance of competition and predation as regulatory forces in the terrestrial ecosystems: evidence from decomposer food-webs. **Oecologia**, v. 93, n. 2, p. 303-306, 1993.
- WHITFORD, W. G. *et al.* The role of nematodes in decomposition in desert ecosystems. In: FRECKMAN, D. W. (Ed.) **Nematodes in soil ecosystems**. Austin: University of Texas Press, 1982. P. 98-116.
- WRIGHT, D. J.; NEWALL, D. R. Nitrogen excretion, osmotic and ionic regulations in nematodes. In: CROLL, N. A. (Ed.). **The organization of nematodes**. London: Academic Press, 1976. Cap. 6, p. 163-210.
- YAN, G. P.; PLAISANCE, A.; HUANG, D. *et al.* **First Report of a New Stunt Nematode *Tylenchorhynchus* sp.** From a Soybean Field in North Dakota. The American Phytopathological Society (APS), 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-17-0616-PDN>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- YEATES, G. W.; WARDLE, D. A.; WATSON, R. N. Relationships between nematodes, soil microbial biomass and weed-management strategies in maize and asparagus cropping systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 7, p. 869-876, 1993.
- YOON, G. Y. *et al.* Effects on *Meloidogyne incognita* of chitinase, glucanase and a secondary metabolite from *Streptomyces cacaoi* GY525. **Nematology**, v. 14, n. 2, p. 175-184, 2012.
- YU, Z. *et al.* The diverse nematicidal properties and biocontrol efficacy of *Bacillus thuringiensis* Cry6A against the root-knot nematode *Meloidogyne hapla*. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 125, p. 73-80, 2015.
- ZAVALA-GONZALEZ, E. A. *et al.* Some isolates of the nepatophagous fungus *Pochonia chamydosporia* promote root growth and reduce flowering time of tomato. **Annals of Applied Biology**, v. 166, n. 3, p. 472-483, 2015.
- ZHANG, X. K. *et al.* Soil nematode response to biochar addition in a Chinese wheat field. **Pedosphere**, v.23, p.98-103, 2013.

CAPÍTULO 11

INTER-RELAÇÃO ENTRE USO/MANEJO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO DOS CERRADOS DO BRASIL

Joaquim Pedro Soares Neto
Heliab Bomfim Nunes
Jamile da Silva Oliveira

Resumo

A região dos cerrados brasileiros destaca-se no cenário nacional, com uma produção agrícola diversificada com grãos, fibras e proteína animal. Esse destaque na produção está associado ao uso eficiente dos recursos naturais, entre eles o solo e a água. Os solos da região dos cerrados têm características peculiares que exigem usos e manejos diferenciados de outras regiões do país. No entanto, com adequado uso e manejo, os processos dissipativos do solo podem ser reduzidos a níveis aceitáveis para solos agricultados. Para que a manutenção da capacidade produtiva seja mantida é importante o monitoramento de índices de qualidade, que possam nortear os técnicos e agricultores sobre a eficiência de cada manejo adotado. Sendo assim, a avaliação de parâmetros como a densidade do solo, porosidade, agregação, carbono orgânico e suas correlações com outros atributos, como a infiltração de água no solo, capacidade de dissipação de energia de desagregação e de compactação e microbiota do solo, tornam-se de fundamental importância para a manutenção dos agroecossistemas. Diante da importância dessas relações, neste capítulo foram revisadas e discutidas a importância de alguns desses parâmetros, apresentando dados de pesquisa de longo prazo e recentes, desenvolvidas nos cerrados brasileiros.

11.1 Introdução

O solo é um corpo complexo cuja natureza é representada por constituintes sólidos (minerais e orgânicos) organizados em um arranjo poroso onde os líquidos (solução do solo), os gases (atmosfera do solo) e a biodiversidade distribuem-se de forma dinâmica e equilibrada. A parte mineral é constituída de partículas unitárias, resultantes do intemperismo do material de origem do solo, apresentando diversas formas, tamanhos, arranjos e composições. O conjunto de partículas de vários tamanhos dá origem à textura do solo. A fração orgânica, conhecida como matéria orgânica do solo, é formada pela acumulação de resíduos animais e vegetais com graus variados de decomposição. Enquanto o arranjo dessas frações forma a estrutura do solo.

A organização dos componentes sólidos do solo determina as características geométricas do espaço poroso onde a água e o ar são retidos e transmitidos. Finalmente tem-se que tanto a água quanto o ar do solo variam em composição no tempo e no espaço. As proporções relativas das três fases no solo variam continuamente e dependem de variáveis tais como: condições climáticas, vegetação e, sobretudo, do manejo do solo.

A distribuição quantitativa das partículas dos solos minerais por diâmetro, representa a distribuição granulométrica do solo, que se constitui na característica física

mais estável. Essa estabilidade faz com que este atributo seja considerado muito importante no momento da realização da descrição, identificação e principalmente da classificação do solo. A textura (partículas primárias < 2 mm) pode ser considerada um dos principais indicadores de qualidade e produtividade dos solos. Essa característica influencia na dinâmica da adesão e coesão que ocorre entre as partículas, na resistência do solo à tração e, ainda, na dinâmica da água no solo (He *et al.*, 2014).

Ao contrário da textura, a estrutura do solo é uma propriedade física que depende diretamente das práticas de manejos adotadas em determinado solo. Solos bem estruturados devem favorecer uma adequada dinâmica de água no perfil, seu armazenamento e disponibilidade para as plantas (Souza *et al.*, 2019), além de possuírem uma proporção entre macro e microporos que possibilitam a penetração das raízes e a aeração, de modo favorável ao estabelecimento, crescimento e desenvolvimento da planta como um todo.

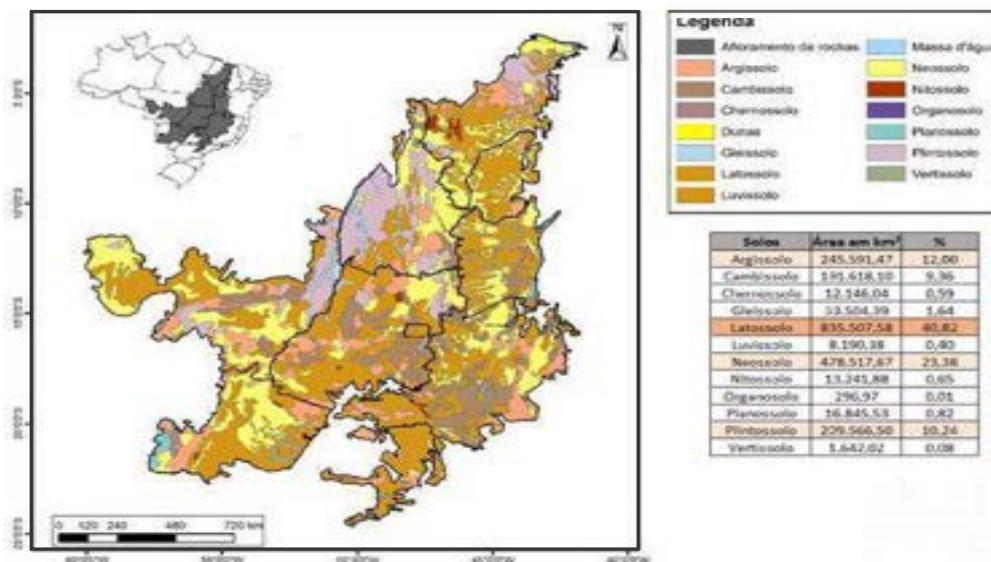
Ralisch *et al.* (2017) reforçam que a estrutura é um dos principais componentes da fertilidade do solo, refletindo, de forma imediata, os efeitos do manejo ao qual esse recurso é submetido, além de proporcionar indicações sobre as interações do solo e a atmosfera. Portanto, em vista do exposto, com relação à importância de estudos relacionados aos atributos do solo e, admitindo-se que os atributos físicos estão inter-relacionados com o manejo, podendo alterá-los ou não. Assim, neste capítulo, são mostradas as inter-relações entre alguns atributos físicos e o manejo dos solos dos cerrados brasileiros.

11.2 Contextualização: Solos do Cerrados brasileiro

11.2.1 Distribuição das classes de solos dos cerrados

Na Figura 1 verifica-se que quatro classes de solos se destacam com maior abrangência territorial na Região dos Cerrados, os Latossolos (40,82%), os Neossolos (23,38), os Argissolos (12,00%) e os Plitossolos (10,24%). As demais unidades mapeadas distribuem-se em pequenas manchas em locais de encostas e margens da rede de drenagem (Souza *et al.*, 2019).

Figura 1 - Mapa de solos dos cerrados brasileiros



Fonte: Souza *et al.* (2019).

Latossolos são solos minerais, homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes reconhecidos facilmente pela cor quase uniforme em profundidade. Os Latossolos são solos com avançado estágio de intemperismo e considerados profundos. A mineralogia da fração argila é representada essencialmente por óxidos de ferro (hematita, goetita), óxidos de alumínio (gibbsita) e por caulinita, com ausência de minerais facilmente intemperizáveis nas frações mais grosseiras. Do ponto de vista físico, os Latossolos apresentam quantidades de macroporos adequadas, o que lhe proporciona boas condições de permeabilidade.

Os solos classificados como Neossolos, são solos pouco evoluídos sem apresentar qualquer tipo de horizonte B. São constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, sendo considerados solos rasos. Esses solos são caracterizados como solos que têm baixa retenção de água, exceto os que possuem a predominância de areia fina sobre areia grossa (Oliveira, 2004).

Os Argissolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B. Estes solos podem ser de textura arenosa, média ou argilosa no horizonte superficial. Apresentam cores mais forte (amarelada, brunada ou avermelhada), maior coesão e maior plasticidade e pegajosidade em profundidade, devido ao maior teor de argila. A fertilidade dos argilosos é variável, dependente principalmente de seu material de origem. Sua retenção de água é maior nos horizontes abaixo da superfície, que podem se constituir em um reservatório de água para as plantas.

Os Plintossolos são solos formados por material mineral, com horizonte plintico, litoplintico ou concrecionário nas seguintes condições: a) iniciando dentro de 40 cm da superfície ou b) iniciando dentro de 200 cm da superfície quando precedidos de horizonte glei ou imediatamente abaixo do horizonte A, E ou dentro de outro horizonte que apresente cores pálidas, variegadas ou com mosqueados abundantes (EMBRAPA-SiBCS, 2018). De modo geral, são solos que apresentam horizonte com pronunciado acúmulo de óxidos de Fe e/ou Al na forma de nódulos e/ou concreções, ou mesmo de camadas contínuas.

11.3 Relação entre uso/manejo e alguns atributos físicos do solo

O comportamento físico de um solo está intrinsecamente relacionado com o arranjo poroso, principalmente no que se refere à distribuição do tamanho dos poros, sua continuidade no perfil do solo e sua estabilidade no tempo. O tamanho e a continuidade dos poros no perfil do solo são diretamente determinados, basicamente, pela textura e pela estrutura, enquanto a estabilidade está relacionada com a consistência do solo.

As alterações no uso e manejo do solo podem provocar mudanças na geometria dos poros, devido às operações de preparo, tratos culturais e colheita de determinada cultura agrícola. Durante o processo de compactação do solo ocorre um aumento de massa por unidade de volume, o que resulta em aumento na densidade do solo, na resistência à penetração de raízes e microporosidade relativa, o que contribui para redução tanto da porosidade total como da macroporosidade (Beutler *et al.*, 2005).

A compactação do solo pelo tráfego de máquinas, durante as etapas do cultivo agrícola, originada da compressão do solo insaturado, vem sendo considerada como a principal causa da degradação física dos solos agrícolas. E essa condição se agrava com

o aumento da intensidade do tráfego das máquinas e implementos agrícolas em condições inadequadas de umidade do solo (Flowres; Lal, 1998).

O manejo do solo ou os métodos de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, os métodos podem promover a degradação da qualidade física do solo, causando restrições ao crescimento radicular. O manejo do solo pode provocar, ainda, mudanças na estrutura, alterando as relações solo-ar-água. A temperatura e a resistência mecânica também podem ser influenciadas e, em consequência a resposta das plantas ao seu máximo potencial produtivo.

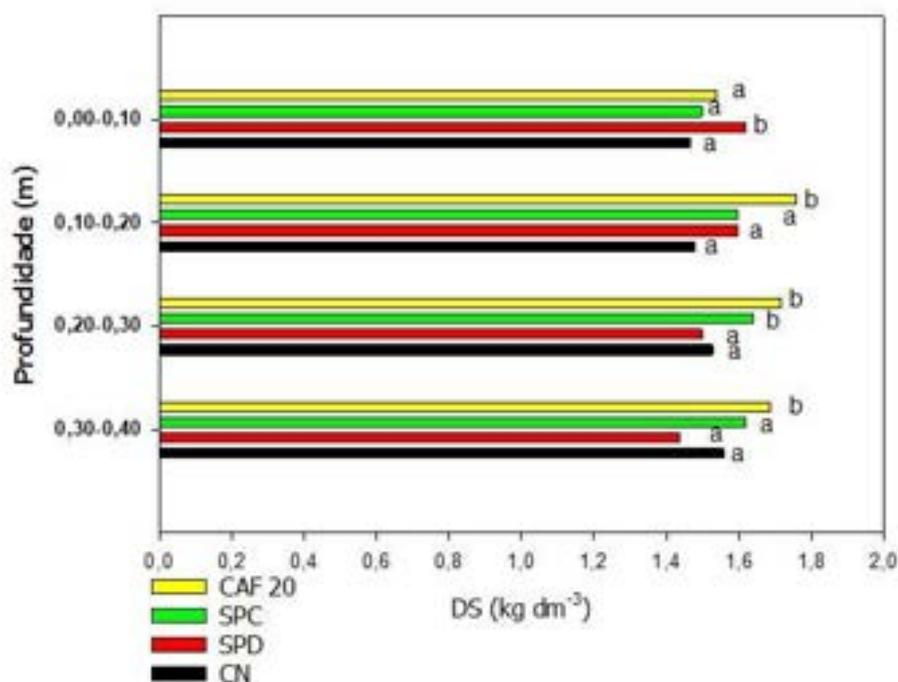
Admitindo-se que o solo é um recurso limitado e que alguns de seus componentes requerem períodos prolongados para serem restaurados, a previsão do grau das perturbações ambientais provocadas pelo manejo inadequado das atividades agrícolas se torna essencial. Métodos e técnicas que visem avaliar e/ou mensurar a qualidade de um solo de forma simples e confiável, ainda são objeto de investigações e, resultados sistemáticos deste monitoramento representam ponto importante nos estudos a respeito de qualidade do solo.

11.3.1 Densidade e porosidade do solo

Nos ecossistemas naturais dos cerrados geralmente ocorre integração harmoniosa entre a cobertura vegetal e os atributos do solo (físicos, químicos e biológicos), derivados dos processos de ciclagem de nutrientes, acumulação e deposição de matéria orgânica. Em geral, a abertura de áreas de vegetação nativa para atividades antrópicas causa alterações em todo ecossistema, principalmente no solo, quando a atividade é agrícola. Um dos efeitos muito comum em manejo de solo, que utilize o uso intensivo de máquinas e implementos na preparação do solo para o plantio, é a formação de camadas compactadas que reduzem a atividade biológica e a macroporosidade no perfil do solo. Essas camadas compactadas, aumentam a densidade, o que proporciona maior resistência física à expansão do sistema radicular.

A densidade do solo pode ser afetada pela variação do espaço poroso do solo. Esta característica além de variar conforme o cultivo ou uso do solo pode variar também conforme o manejo de solo, como foi observado por Sol et al. (2021), estudando a densidade do solo em Latossolo Vermelho-Amarelo com textura franco-arenosa (Figura 2) em café após 20 anos de cultivo (CAF20), sistema com plantio convencional (SPC), sistemas de plantio direto (SPD) comparando ao cerrado com vegetação natural observaram que SPD apresentou densidade maior ($p < 0,05$) que nos demais sistemas (CAF20, SPC e CN), na camada superficial (0,00-0,10 m).

Figura 2 - Densidade do solo (DS) em Latossolo Vermelho-Amarelo (sistemas de cultivo em plantio direto (SPD), plantio convencional (SPC) e café com 20 anos (CAF20) comparados com o cerrado nativo (CN)



Fonte: SOL *et al.* (2021).

Ainda com relação à Figura 2, observa-se que na camada de 0,10-0,20 m e 0,30-0,40 m as densidades do solo nos sistemas de plantio direto e convencional não diferiu do CN. Destaca-se, também, que na camada de solo 0,20 a 0,30 m o SPD não diferiu estatisticamente do cerrado nativo. Por outro lado, observa-se que o SPC e CAF 20 apresentaram valores maiores ($p < 0,05$) indicando uma provável compactação subsuperficial conhecida como “pé de grade”. Fernández-Ugalde *et al.* (2009) também encontraram diferença significativa entre SPD e SPC, principalmente na camada superficial do solo.

A densidade do solo é influenciada pelos sistemas de cultivo e manejo, em que alterem a estrutura e o espaço poroso a ela associados, interferindo na porosidade total, distribuição de poros por tamanho, capacidade de aeração, quantidade de água disponível, permeabilidade e taxa de infiltração. A densidade do solo permite ainda avaliar o seu nível de compactação, além de possibilitar inferência sobre as restrições ao desenvolvimento radicular das plantas (Souza *et al.*, 2019).

A utilização isolada da densidade do solo, como indicador de compactação, pode não refletir o verdadeiro grau de compactação, uma vez que este atributo é influenciado pela mineralogia, textura e conteúdo de matéria orgânica. Buscando de relacionar a densidade do solo com um atributo mais estável do solo, Reinert e Reichert (1999) determinaram os limites críticos de DS argila para o desenvolvimento das plantas em função do conteúdo de argila do solo (Tabela 1).

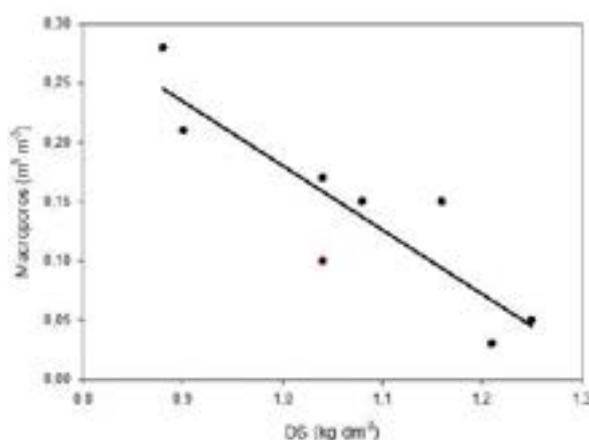
Tabela 1- Limites críticos da densidade do solo (DS) em função do conteúdo de argila

Conteúdo de argila (g kg ⁻¹)	DS (kg dm ⁻³)
>550	1,45
200 < argila ≤ 550	1,55
≤ 200	1,65

Fonte: Reinert; Reichert (1999).

A densidade e a porosidade do solo são propriedades relacionadas com alterações no volume de solo, portanto, determinantes na compactação do solo. A redução da porosidade ocorre geralmente nos macroporos, responsáveis pela infiltração e aeração do solo. Wendling *et al.* (2012), trabalhando com um latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argiloso, nos cerrados mineiro, observaram uma relação inversa, com alta correlação ($R = 0,8872$), entre a macroporosidade e densidade do solo (Figura 3).

Figura 3 - Macroporos em função da densidade do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argiloso



Fonte: Adaptado de Wendling *et al.* (2012).

Fagundes *et al.* (2019) estudaram a porosidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, com quatro manejos diferentes, comparando-os com o mesmo solo sob vegetação natural (CN), conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Tratamentos utilizados no estudo de Fagundes *et al.* (2019) em Latossolo Vermelho-Amarelo

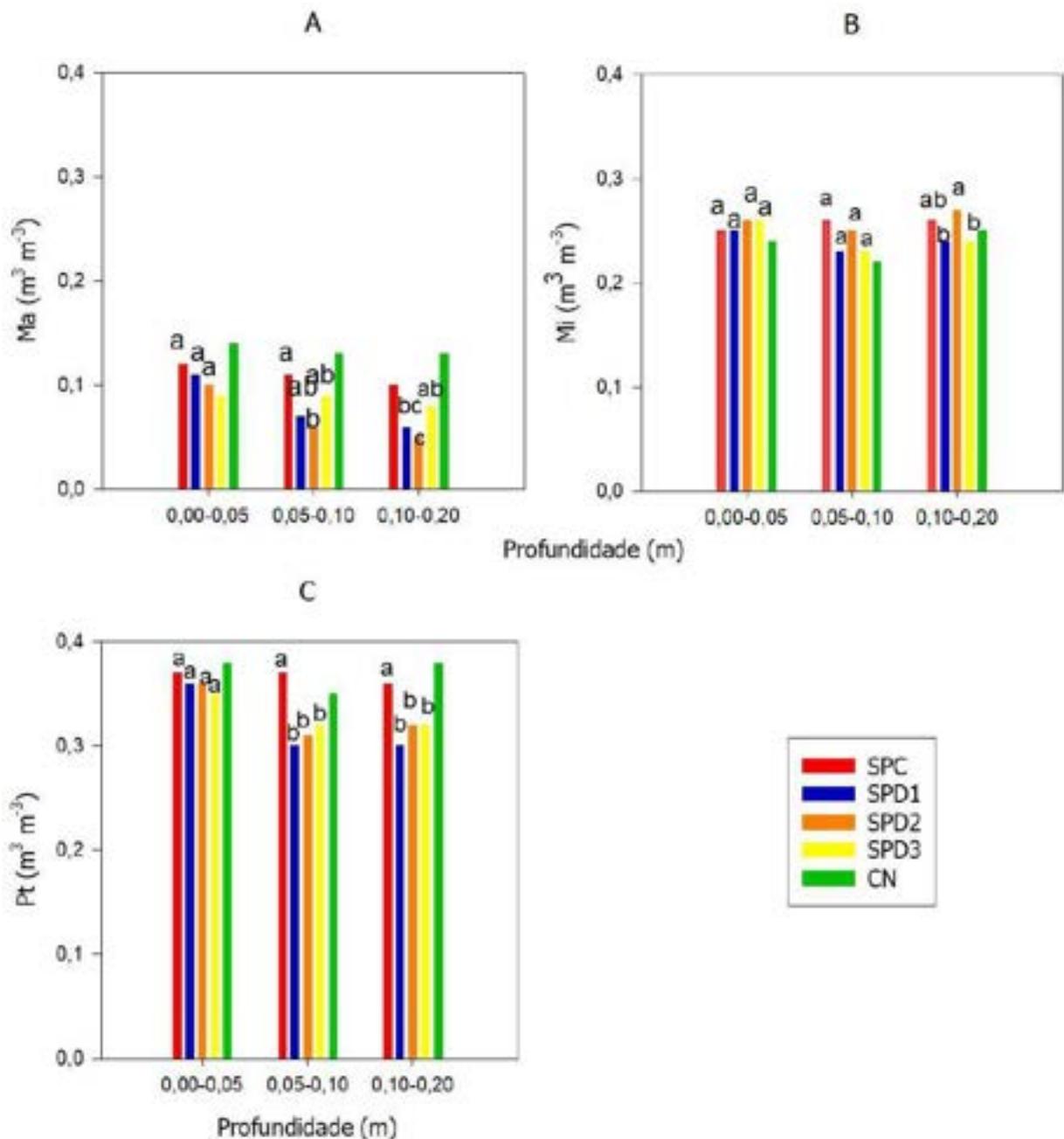
Manejo	Safrá					
	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Plantio convencional (SPC)	M	M	M	M	M	M
Plantio direto (SPD1)	S	M+B	S	M+B	S	M+B
Plantio direto (SPD2)	Mt+A	S+Mt	M+B	A	S+Mt	M+B
Plantio direto (SPD3)	Mt+A	S+C	M+C	A	S+C	M+C

Legenda: M = Milho; S = Soja; Mt = Milheto; B = Braquiária; A = Algodão; C = Crotalária. M+B = Milho em consórcio com Braquiária; SPD1 = milho em consórcio com Braquiária (B) em sucessão à Soja (S); SPD2 = Milheto (Mt) e Algodão (A); e SPD3 = Milho (M) sob SPD em consórcio com Crotalária (C).

Fonte: Fagundes *et al.* (2019).

A Figura 4 mostra que após seis anos de cultivo, os manejos adotados não apresentaram efeito significativo na camada de solo de 0,00 a 0,05 m para as variáveis macroporos (Ma), microporos (Mi) e poros totais (Pt). Na camada de 0,05 – 0,10 m o sistema com plantio convencional (SPC) apresentou valores significativamente maiores para Ma e Pt, enquanto os valores de Mi não evidenciaram diferenças entre os manejos. Na última profundidade de 0,10 a 0,20 m, o SPC com cultivo contínuo de milho mostrou-se com maior macroporosidade e porosidade total comparado com os demais tratamentos (Fagundes *et al.*, 2019). Esses resultados podem ter sido favoráveis ao SPC, devido ao estudo ter sido realizado apenas na camada superficial.

Figura 4 - Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico



Fonte: Fagundes *et al.* (2019).

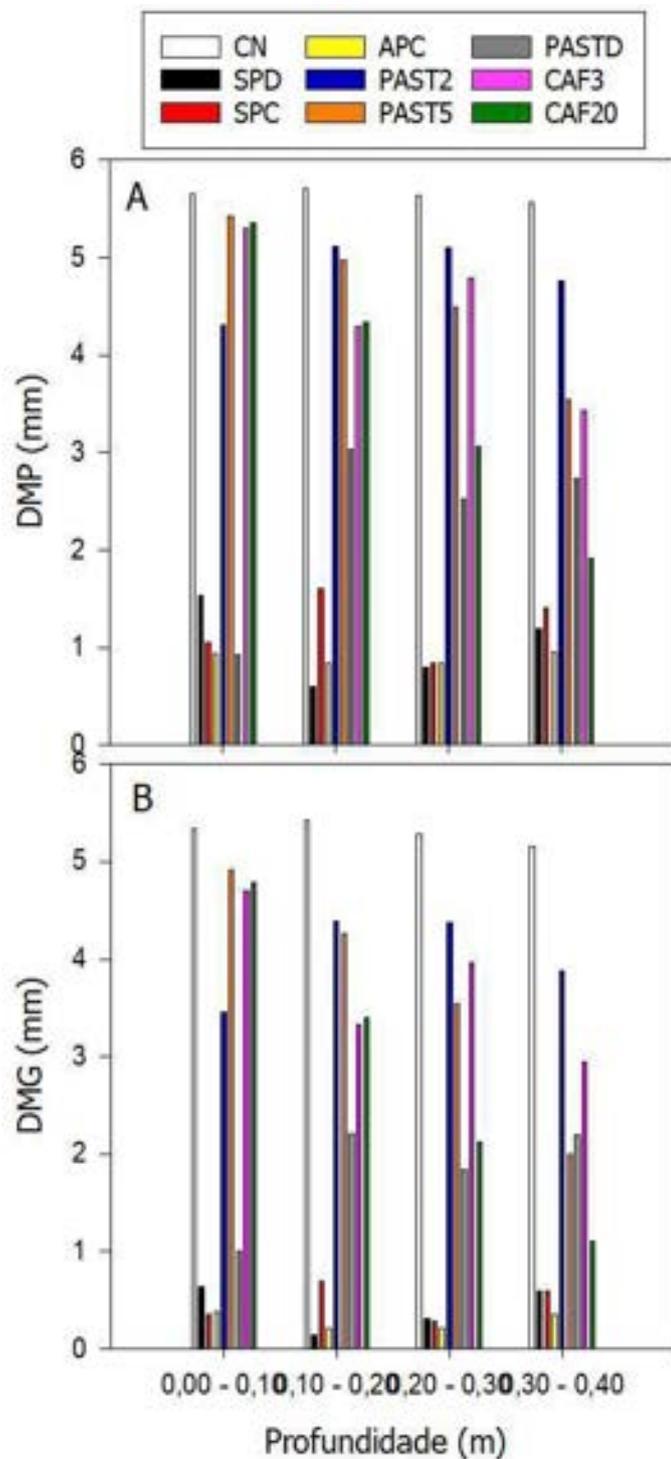
Ainda merece destaque, nos dados de Fagundes *et al.* (2019), o valor da macroporosidade, que tende a ser menor que no cerrado nativo, para qualquer manejo utilizado e em todas as profundidades avaliadas. Os autores desse trabalho afirmam que, de maneira geral, todos os tratamentos, nas três camadas avaliadas, apresentaram aumento da densidade do solo quando comparados com o cerrado natural a partir da camada de 0,05-0,10 m nos manejos com SPD1, SPD2 e SPD3. O que, provavelmente, explica a tendência de redução da macroporosidade do solo, mesmo sem apresentar significância estatística. A influência do manejo do solo e da cultura na porosidade, principalmente na macroporosidade, também não foi encontrada por Regis *et al.* (2015) quando estudaram solos sob plantio direto com dois, seis, oito e 11 anos de implantação. Já, Andreotti *et al.* (2010), constataram, para Latossolo Vermelho do Matogrosso da Sul, especialmente uma correlação direta entre a produção de grãos de soja e a macroporosidade na camada de 0,0- 0,10 m e 0,10 - 0,20 m. Os autores concluíram que a macroporosidade do solo, avaliada na camada de 0- 0,10 m, apresentou-se como o melhor indicador da qualidade física do solo quando destinado à produtividade de soja em sistema plantio direto.

11.3.2 Agregados do solo

A estabilidade dos agregados em água é importante na manutenção do espaço poroso do solo, que influencia a areação, a dinâmica da água, a temperatura do solo e conseqüentemente o crescimento radicular. Além disso, outras propriedades podem ser beneficiadas pela agregação do solo, tais como, sequestro de carbono e retenção de nutrientes (Mergem Junior *et al.*, 2019).

Sol *et al.* (2021) determinaram o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) para nove usos e manejos diferentes para Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Observaram que o DMP e DMG, na camada superficial do solo (0,00 – 0,10 m), foram menores nos sistemas com soja em plantio direto (SPD), soja em plantio convencional (SPC), algodão em plantio convencional (APC) e pastagem degradada (PASTD), (Figura 5).

Figura 5 - Diâmetro médio ponderado (A) e diâmetro médio geométrico (B) em diferentes usos e manejos de solo no Oeste da Bahia



Legenda: CN = cerrado natural, SPD = soja com plantio direto, SPC = soja com plantio convencional, APC = algodão em plantio convencional, PAST2 = pastagem com 2 anos de implantação, PAST5 = pastagem com 5 anos de implantação, PASTD = pastagem degradada, CAF3 = café com 3 anos de implantação e CAF20 = café com 20 anos de implantação.

Fonte: Sol *et al.* (2021).

Verifica-se ainda, na Figura 5, que a ruptura dos agregados do solo, por meio das operações de preparo, ficou evidente nas áreas, cujos manejos são mais intensos e em processo de degradação, tais como, os sistemas com soja em plantio convencional (SPC), com algodão em plantio convencional (APD) e com pastagem degradada (PASTD). No SPD, o DMP e DMG também se apresentaram baixos. Indicando que o tempo, desde a adoção deste sistema, não foi suficiente para recuperação da estrutura do solo (Pragana et al., 2012). Loss *et al.* (2011) comparando sistema de plantio direto com integração lavoura-pecuária verificaram que, em todas as classes de agregados, o sistema com plantio direto foi o que apresentou menor massa de agregados, com exceção para a classe maior que 2 mm na camada de 0,00-0,05 m.

Nas duas camadas superficiais (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m), os tratamentos com PAST2, PAST5, CAF3 e CAF20 não foram diferentes significativamente ($p < 0,05$) da testemunha (cerrado natural (CN)) para o DMP e DMG. Porém, de acordo com Tabela 3, em que o DMP é classificado em cinco níveis, pode-se afirmar que em todas as camadas avaliadas os sistemas com SPD, SPC, APC e PASTD apresentaram DMP instável, já os solos sob PAST2, PAST5, CAF3 e CAF20 foram classificados como de DMP muito estável, principalmente nas camadas superficiais.

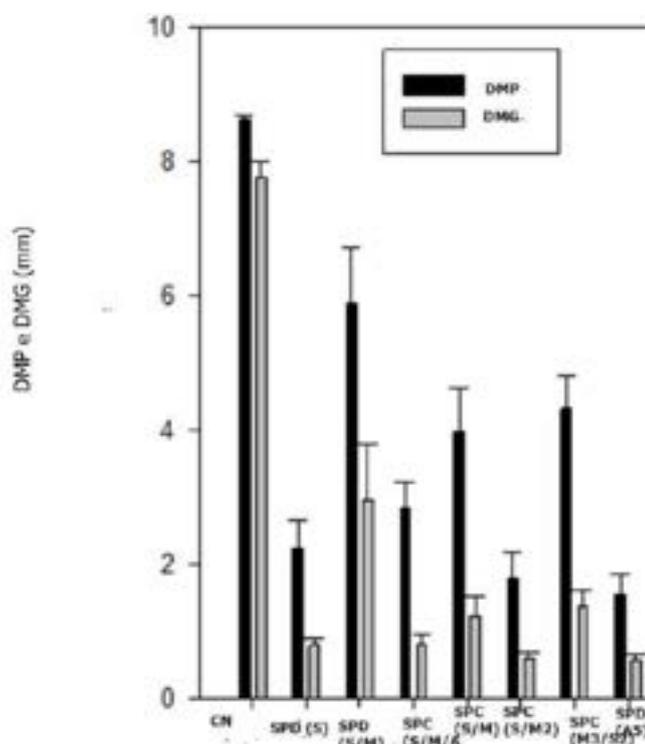
Tabela 3 - Classificação do diâmetro médio ponderado DMP de acordo com Le Bissonais

Classe	DMP (mm)	Estabilidade
1	< 0,4	Muito instável
2	0,4 – 0,8	Instável
3	0,8 – 1,3	Médio
4	1,3 – 2,0	Estável
5	>2,0	Muito estável

Fonte: Soares, R. *et al.* (2019).

Nunes *et al.* (2020), conduziram um trabalho com diferentes manejos em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Figura 6), observaram que os manejos estudados, apresentaram valores menores que a área com cerrado natural (CN) e dentre estes manejos, o plantio direto com rotação soja/milho (SPD (S/M)) nos últimos 5 anos, o DMP mostrou-se maior que os demais sistemas.

Figura 6 - DMP e DMG em diferentes manejos de solo (plantio direto com soja nos últimos oito anos (SPD(S)), plantio direto com rotação soja/milho nos últimos cinco anos (SPD(S/M)), plantio convencional com rotação nos últimos cinco anos soja/milho/algodão (SPC (S/M/A)), plantio convencional com rotação soja/milho nos últimos cinco anos (SPC(S/M)), plantio convencional com soja por três anos e milho nos últimos dois anos (SPC(S/M2)), plantio convencional com milho por três anos e soja nos últimos dois anos (SPC(M/S)) e plantio direto com algodão nos últimos cinco anos (SPD(A5)), em Latossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico órtico)



Fonte: Os Autores (2023).

Novelli *et al.* (2011) observaram que sucessivos cultivos de soja, mesmo em diferentes classes de solo, reduziram o carbono orgânico e a agregação das partículas de solo. Por outro lado, Nouwakpo *et al.* (2018) observaram que o cultivo do milho foi mais eficiente na manutenção da estabilidade de agregados do solo em comparação com o cultivo da soja.

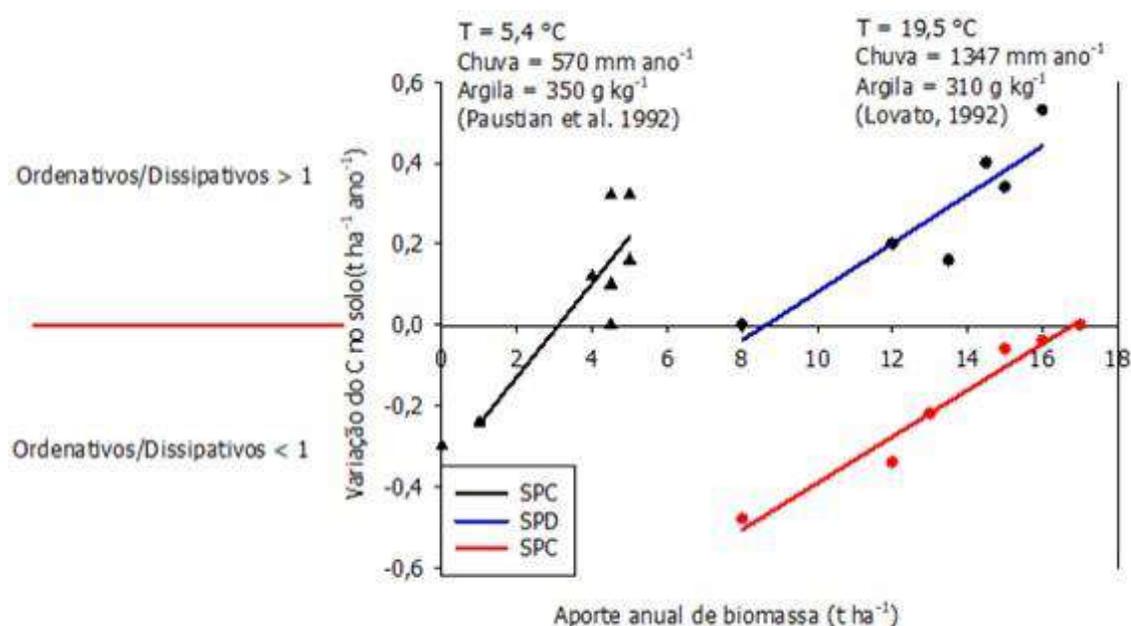
11.4 Relação biomassa vegetal e atributos físicos do solo

O solo é considerado um sistema aberto termodinamicamente, significando que o solo troca energia e matéria com o ambiente ao seu redor, onde a entrada de energia solar alimenta os processos ordenativos e dissipativos que ocorrem no solo. A relação entre estes processos determina a degradação (ordenativos/dissipativos < 1) ou conservação/recuperação (ordenativos/dissipativos > 1) do solo (Bayer *et al.* 2019).

Preparos intensos do solo associados ao baixo aporte de fitomassa residual, pela monocultura e queima de fitomassa residual determinam uma baixa intensidade dos processos ordenativos e elevada a intensidade dos processos dissipativos, aumentando a entropia e reduzindo a entalpia, provocando a degradação da estrutura do solo.

Na Figura 7, observa-se que a quantidade de biomassa vegetal a ser aportada para que a razão entre processos ordenativos/dissipativos no solo sejam superiores a um (1), tem relação direta com o clima, com uso e manejo do solo. Verifica-se que em solo de clima temperado, com o uso de sistema convencional de preparo de solo (SPC), a razão processos ordenativos/dissipativos, tornam-se maiores que (um) 1, com culturas que aportem acima de três t ha⁻¹ ano⁻¹ de biomassa vegetal. Já, em solos de clima tropicais/subtropicais brasileiros, com o mesmo manejo e conteúdo de argila similar, seriam necessários culturas que adicionem quantidades de biomassa acima de 17 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Figura 7 - Razão entre a razão da intensidade dos processos ordenativos e dissipativos nos solos avaliados pela taxa de alteração anual do estoque de C de compostos orgânicos (CO) no solo em sistema com plantio convencional (SPC) e plantio direto (SPD) e da quantidade de C aportado anualmente pelas culturas, em região de clima temperado e tropicais/subtropicais



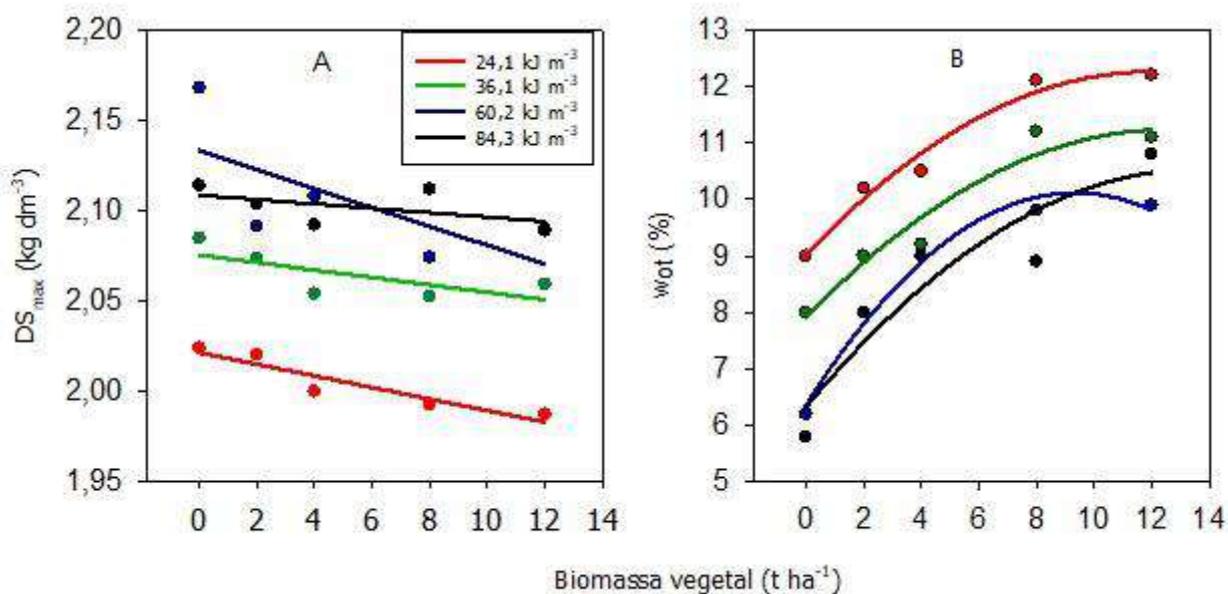
Fonte: Adaptado de Mielniczuk *et al.* (2003).

Assim, a falta de opções de sistemas de culturas, que permitam aportar anualmente essa quantidade de biomassa vegetal, sugere que a agricultura convencional, com base em sistema com intenso revolvimento do solo, seja inviável, técnica e ambientalmente, em regiões tropicais e subtropicais úmidas, por resultar em degradação do solo. Devendo-se a isso, basicamente ao fato da energia recebida, via radiação solar, ser aproximadamente o dobro nas regiões tropicais/subtropicais em comparação com as regiões temperadas, isto tem forte implicação nas taxas dos processos de natureza biológica (Bayer *et al.*, 2019).

Por outro lado, em sistema com plantio direto em solos tropicais/subtropicais, quando o aporte de biomassa vegetal é superior a aproximadamente nove t ha⁻¹ ano⁻¹, a razão processos ordenativos/dissipativos passa a ser superior a um (1) (Figura 7). Porém, nas condições tropicais e subtropicais a melhoria da qualidade do solo só será alcançada com a adoção simultânea dos dois fundamentos do manejo de solo, não revolvimento e alto aporte de biomassa vegetal (Bayer *et al.*, 2019).

Outra influência direta da biomassa vegetal em processos ordenativos do solo é a diminuição da compactação. Rocha e Soares Neto (2009), trabalhando com um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, avaliaram pelo ensaio de Proctor, seis níveis de biomassa vegetal sobre o solo e quatro níveis de energia de compactação (E_c). Esses autores observaram que quanto maior a quantidade de biomassa vegetal presente na superfície do solo, menores foram os valores de densidade máxima obtidos, independentemente do nível de E_c aplicado (Figura 8A). Na Figura 8B, estão os teores de água crítico (w_{ot}) para compactação do solo, ou seja, o conteúdo de água no solo que o leva a máxima compactação. Verifica-se que para qualquer E_c , quanto maior a quantidade de palha utilizada, maior a quantidade de água necessária para atingir a densidade máxima do solo. Em termos práticos pode significar mais tempo disponível ao produtor para operações com máquinas que precisem trafegar sobre o solo úmido.

Figura 8 - Densidade máxima e umidade ótima de compactação em função da palhada sobre o solo

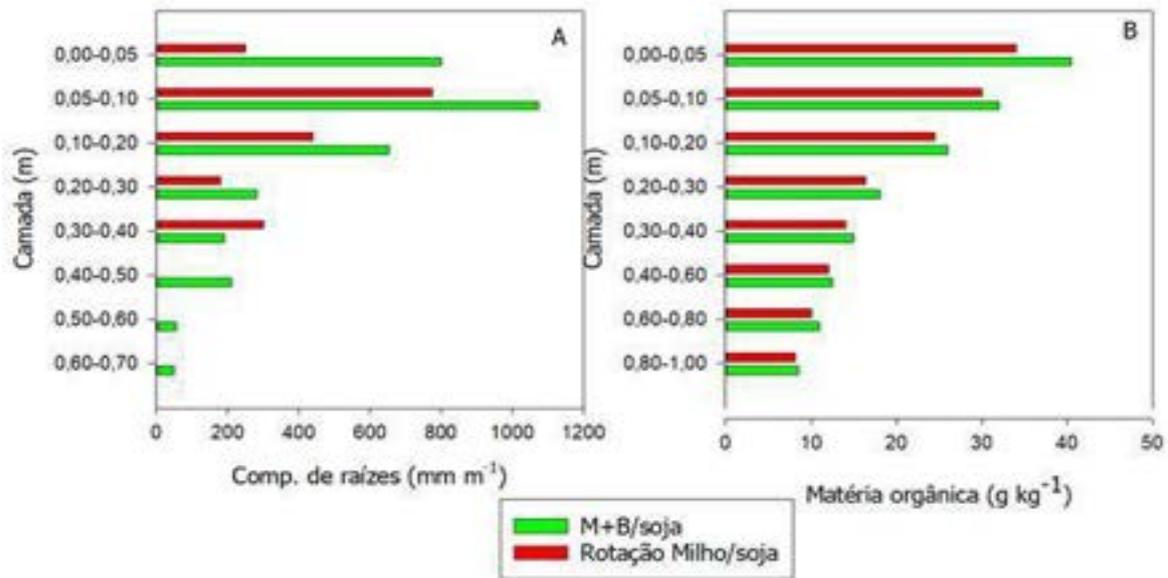


Fonte: Rocha e Soares Neto (2009).

Constatou-se que $12\ t\ ha^{-1}$ de palha chegou a dissipar até 44,80% de energia de compactação, o que corrobora com o trabalho de Braida *et al.* (2006), que encontraram uma dissipação de 33,3% e Rosim *et al.* (2012), que observaram efeito da palhada na redução da resistência do solo a penetração das raízes.

Salton e Tomazi (2014) utilizando o sistema integrado lavoura-pastagem, num Latossolo Vermelho distroférico argiloso, após três safras consecutivas com milho solteiro ou milho consorciado com braquiária, na entressafra da soja, detectaram aumento no volume de raízes e de matéria orgânica do solo em todas as camadas (Figura 9A e 9B). Destaca-se, também, que solo cultivado com braquiária apresentou um volume de raízes em camadas mais profundas que o solo, apenas com rotação milho/soja.

Figura 9 - Crescimento de raízes de soja e matéria orgânica em Latossolo Vermelho distroférrico após três safras consecutiva com milho e milho consorciado com braquiária, na entressafra da soja

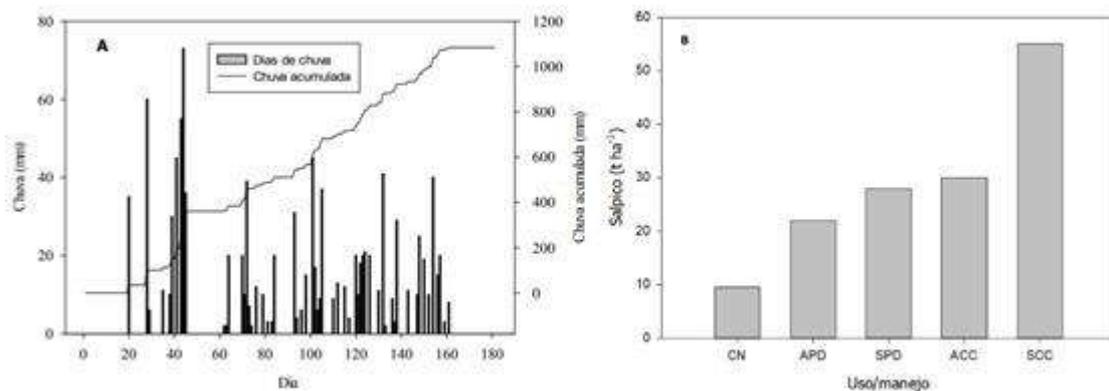


Fonte: Salton e Tomazi (2014).

Outra variável que pode potencializar os processos dissipativos do solo é o salpico ou “Splash”. O impacto da gota de chuva contra o solo, desagrega as partículas, podendo lançar os sedimentos por vários centímetros a partir do local de origem, provocando maiores ou menores efeitos nos processos ordenativos e dissipativos do solo, dependendo da duração e intensidade da chuva, ausência ou presença da biomassa vegetal sobre o solo e declividade do terreno.

Em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco argilo-arenoso, com chuvas de outubro a abril, observou-se precipitação, acima de 50 mm dia⁻¹, especialmente nos meses iniciais do intervalo chuvoso da região. Período em que o índice de cobertura do solo pelas culturas temporárias regionais, é baixo, favorecendo, assim, o impacto direto das gotas de chuva na superfície do solo (Figura 10A).

Figura 10A e 10B - Chuvas diárias e acumuladas (A) e produção de salpico em lavouras com diferentes usos e manejos do solo no Oeste da Bahia



Fonte: Soares Neto *et al.* (2020).

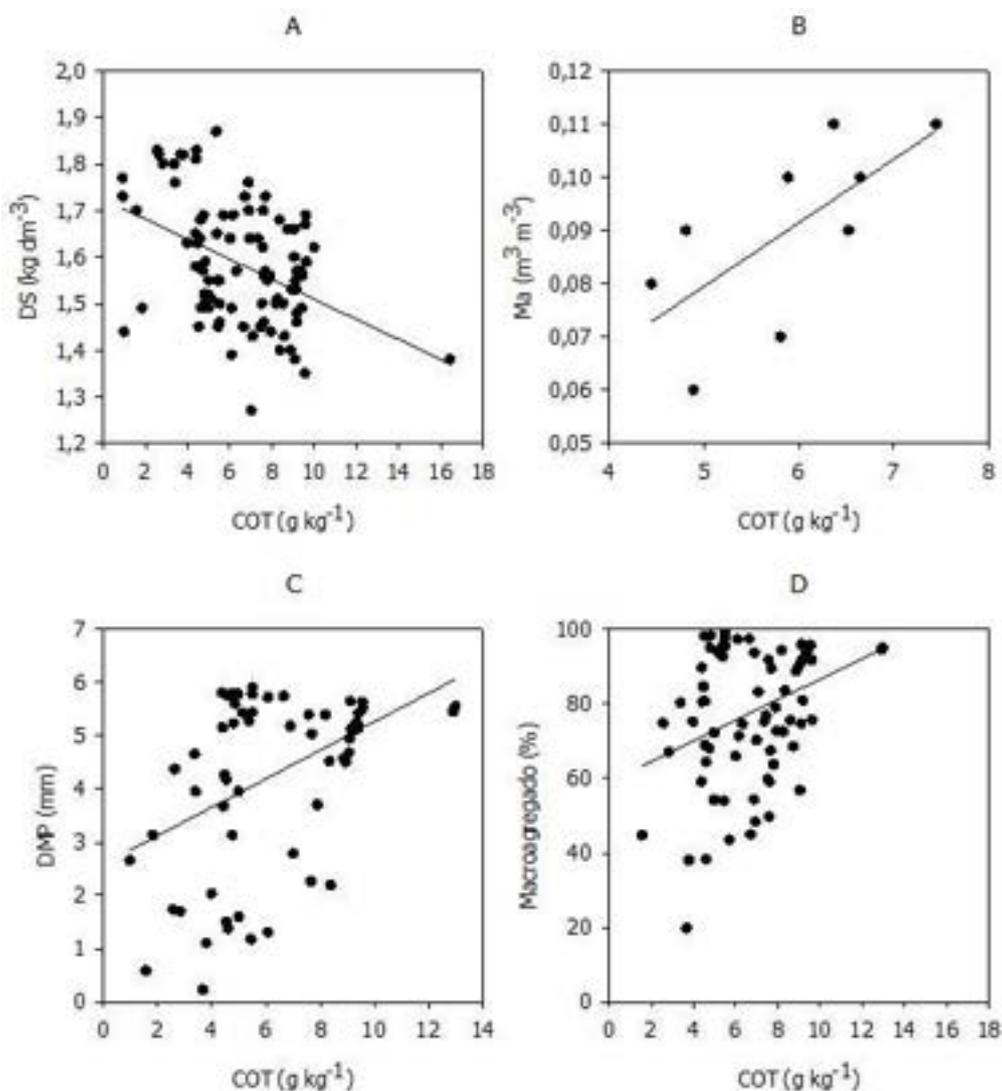
Na Figura 10B, estão apresentados os resultados totais de desagregação das partículas de solo (salpico) para cada uso/manejo avaliado. Observa-se a diferença entre os valores acumulados de salpico durante o ciclo das culturas, obtidos para o controle (CN) e as outras quatro condições experimentais: algodão com plantio direto (APD), soja com plantio direto (SPD), algodão com plantio convencional (ACC) e soja com cultivo convencional (SCC).

Os volumes acumulados de salpico, para as áreas cultivadas com APD e SPD, apresentaram os menores valores. Enquanto o SCC foi o que apresentou maior volume de partículas desagregadas (Figura 10B). Demonstrando a importância dos sistemas de cultivos conservacionistas. No solo com SCC, 82% da produção de salpico ocorreu nos primeiros dois meses após a semeadura. Esses resultados apontam, também, para a importância da cobertura do solo pela biomassa vegetal como técnica de controle da erosão. Por fim, maiores volumes médios de chuvas podem aumentar a produção de sedimentos, enquanto o cultivo de pastagem, cana-de-açúcar, biomassa vegetal sobre o solo e mata nativa reduzem o salpicamento (Ramos *et al.*, 2011; Fachim *et al.*, 2019).

11.5 Carbono orgânico e biomassa vegetal e suas relações com os atributos físicos do solo e a produtividade da soja

O carbono orgânico do solo tem mostrado que possui influência direta nos atributos físicos, tais como: densidade do solo, porosidade e agregação do solo (Figura 11). Pode-se observar nesses estudos que o carbono orgânico do solo produz efeitos significativos nestas propriedades, com decréscimo da densidade do solo (DS), ou seja, apresentou uma relação inversa com carbono orgânico total (CO). Por outro lado, o CO promove aumento da macroporosidade (Ma), do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP) e da macroagregação.

Figura 11 - Densidade do solo (DS), macroporosidade (Ma), diâmetro médio ponderado (DMP) e macroagregados em função do carbono orgânico total



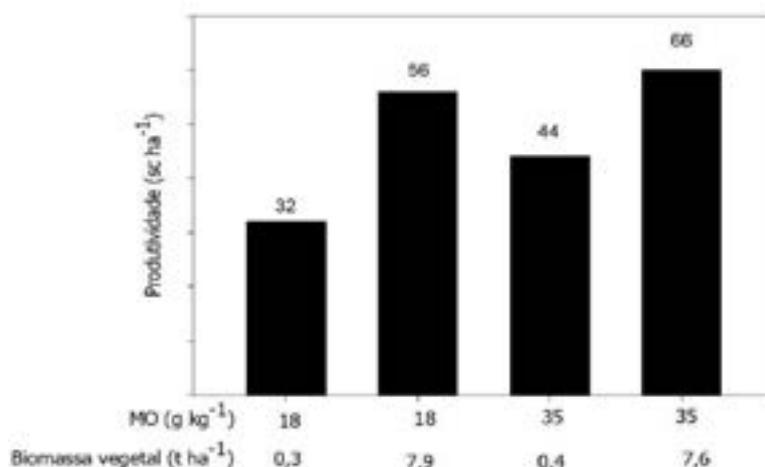
Fonte: Os Autores (2023).

Os fluxos de energia e CO no solo, determinados pelos sistemas de manejo, são responsáveis pelo maior nível de organização dos agregados do solo. Portanto, alto aporte de resíduos vegetais determinam maior diâmetro médio ponderado, maior macroporosidade que permitem trocas gasosas entre o ar do solo e o ar atmosférico, de forma a reduzir no solo o teor de CO_2 e aumentar o de O_2 (Braidá *et al.*, 2007; Souza *et al.*, 2019).

Os efeitos combinados dos fatores matéria orgânica (MO) e biomassa vegetal aumentaram a produtividade da soja em até 34 sacas por hectare (Figura 12). Verifica-se que se mantendo o conteúdo de matéria orgânica em 18 g kg^{-1} e alterando a biomassa vegetal $0,3$ a $7,9 \text{ t ha}^{-1}$ a produtividade da soja passou de 32 para 56 sc ha^{-1} . O mesmo ocorre quando mantém-se constante a MO em 35 g kg^{-1} e aumentando a fitomassa de $0,4$ para $7,6 \text{ t ha}^{-1}$ a produtividade da cultura sofre um incremento de 44 para 66 sc ha^{-1} . Resultados como estes reforçam o entendimento de que o manejo sem revolvimento, com

alto aporte de biomassa vegetal e matéria orgânica no solo reflete em produtividade das culturas, decorrente das alterações expressivas na qualidade do solo (Bayer *et al.*, 2019).

Figura 12 - Produtividade de soja em função do teor de Matéria orgânica e da cobertura do solo em plantio direto



Fonte: Adaptado de Bayer *et al.* (2019).

Os benefícios da matéria orgânica do solo e do aporte de biomassa vegetal foram, também, relatados por Salton e Tomazi (2019), no Matogrosso do Sul. Onde alcançaram maiores produtividades das culturas em anos sujeitos às adversidades climáticas e na redução dos custos de produção, com eventual redução do uso de insumos. Naquela situação, as áreas com maior cobertura do solo e maior teor de matéria orgânica apresentaram os menores prejuízos.

11.6 Considerações finais

O solo é um sistema natural aberto e complexo, onde matéria e energia podem ser adicionadas ou removidas. A composição do solo em fases, sólida (minerais e orgânicos), líquida (solução do solo) e gasosa (atmosfera do solo), compoem os fatores químicos, físicos e biológicos, em conjunto, proporcionam o crescimento e desenvolvimento das plantas. O arranjo das partículas, associado ao espaço poroso entre elas, incluindo o tamanho, a forma e os agregados formados pelo agrupamento das partículas primárias em unidades separáveis, determinam a estrutura do solo, que associado ao sistema poroso domina as relações-solo-planta.

As alterações nos atributos físicos do solo promovidos pelo manejo podem favorecer os processos ordenativos ou dissipativos, aumentando ou diminuindo sua capacidade produtiva. Assim, a adoção simultânea dos dois fundamentos do manejo conservacionista: não revolvimento do solo e alto aporte de fitomassa residual é condição fundamental para melhoria da qualidade do solo com conseqüente ganhos de produtividade nas culturas.

Por fim, é importante salientar que qualquer ação antrópica causa modificações de maiores ou menores magnitudes no ambiente, e especialmente, no solo. Porém, um manejo adequado do solo influencia na quantidade e na qualidade da matéria orgânica, a

qual tem estreita relação com as propriedades físicas do sistema solo, proporcionando, ganho de produtividade e manutenção da qualidade ambiental. Portanto, a adoção de sistemas conservacionistas é fundamental para manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas naturais e dos sistemas agrícolas dos cerrados.

Referências

- ANDREOTTI, M.; PASSOS, M.; MONTANARI, C. R. *et al.* Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.3, p.520-526, 2010.
- BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Sistema de manejo conservacionista e qualidade de solos; com ênfase na matéria orgânica. *In*: BERTOL, I.; de MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (Ed). **Manejo e conservação do Solo e da Água**. Viçosa, MG: SBCS, p.315-343. 2019.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. C.; ROQUE, C. G. *et al.* Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n. 6. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600002>.
- BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A. *et al.* Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *In*: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed). **Tópicos de Ciência do Solo**, v. VII, Viçosa, MG, 2006. p. 221-277.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF. Embrapa, 2018. 356p.
- FACHIN, P. A.; Gonçalves JUNIOR, E. V.; THOMAZ, E. L. Comparação entre dois modelos de agitador yoder na avaliação da estabilidade de agregados de solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n. 2, p. 697-704. 2019.
- FAGUNDES, M. O.; REIS, D. A.; PORTELLA, R. B. *et al.* Qualidade de um latossolo sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado baiano, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.3, p..281-297, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0024>.
- FERNÁNDEZ-UGALDE, O.; VIRTO, I.; BESCANSÀ, P. *et al.* **No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone semiarid soils**. *Soil & Tillage Research*, v.106, p.29–35, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.012>.
- FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.48, p. 21-35. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00095-6).
- HE, Y. *et al.* A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rainfed condition. **Scientific Reports**, v. 4, p. 1-12, 2014.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G. *et al.* Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p1369-1276. 2011.

- MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E. DOS S. *et al.* Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p. 1-8. 2019.
- MIELNICZUB, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. **Manejo de solo e cultura e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo**. Tópicos de Ciência do Solo, v.3. 2003.
- NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, A. P.; NORONHA, N. C. *et al.* Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 232-241. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100024>.
- NOUWAKPO, S. K.; GONZALEZ, J. M.; SONG, J. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems. **Soil and Tillage Research** 178, p. 65-71. 2018.
- NOVELLI, L. E.; MELCHIORI, R.; CAVIGLIA, O. **Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols**. *Geoderma* 167, p. 254-260. 2011.
- NUNES, H. B.; SOARES NETO, J. P.; ROSA, V. A. *et al.* Physical attributes and organic matter in soils with different use/management cultivated with the main crops in the Cerrado of Western Bahia, Brazil. **Revista Científica**, v. 48, n.4, p. 386-395. 2020.
- OLIVEIRA, J. B. de. **Pedologia Aplicada**. Piracicaba, SP: FEALQ, 2008.
- PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NóbREGA, J. C. A. *et al.* Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1591-1600, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500023>.
- RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. *et al.* **Diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES)**. Documentos, n. 390, Embrapa, Londrina, PR, 2017. 64p.
- RAMOS, F. T.; RAMOS, D. T.; CREMON, C. *et al.* Erosão por salpicamento sob diferentes sistemas de manejo em um Neossolo Quartzarênico em Cáceres (MT). **Global Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 38-50. 2011.
- REGIS, M. S.; SOARES NETO, J. P.; SILVA, L. S. *et al.* Análise dos atributos físicos de solos de cerrado submetido ao plantio direto ao longo do tempo. *In: Anais, III Reunião Centro -Oeste de Ciência do Solo*. Barra do Garças, MT, 2015.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. *In: Sembra directa: uma ferramenta para a agricultura conservacionista*. Anais...Florionópolis. Empasc, 1999.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciências Ambiental**, v. 27, p. 29-48. 2003.
- REINART, D. J.; E REICHERT, J. M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. *In: Análise de la Siembra directa: una herramienta para la agricultura conservacionista*, CD-ROM;1999, Florionópolis: Empasc.
- ROCHA, S. O.; SOARES NETO, J. P. Influência de diferentes quantidades de palha na energia de compactação, resultante do tráfego de máquinas em Latossolo Vermelho-Amarelo de Cerrado Baiano. **Revista Direto no Cerrado**, n. 54, Associação de Plantio Direto no Cerrado. 2009.

ROSIM, D. C.; DE MARIA, I. C.; SILVA, R. L. *et al.* **Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférrico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície.** *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4, p.502-508, 2012.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo.** Comunicado Técnico, n.198. Dourados, MS. 2014. 5p.

SOARES NETO, J. P.; MAGALHÃES, E. C. D.; NUNES, H. B. *et al.* Erosão por salpico com chuva natural e resistência do solo a penetração em Latossolo Vermelho-Amarelo do Oeste da Bahia, Brasil. *In: SILVA-MATOS, R. R. S.; Oliveira, A. R. F.; Matos, S. S. O meio ambiente sustentável.* Atena, Ponta Grossa (PR). 2020, p. 64-74. DOI: <http://doi.org/10.22533/at.ed.9952012067>.

SOARES, R.; MADDOCK, J. E. L.; CAMPOS, D. V. B. *et al.* Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio. **Revista Virtual Química**, v.10, n. 6, p.1693-1718. 2019. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180114>.

SOL, P. J. S. N.; SILVA, L. S.; SOARES NETO, J. P. *et al.* Propriedades físicas e carbono orgânico em camadas do solo sob diferentes usos e manejos nos cerrados do Oeste da Bahia, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, 2021, p. 1-11.

SOUZA, L. S.; MAFRA, A. L.; SOUZA, L. D. *et al.* Interrelação entre manejo e atributo físico do solo. *In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. da S. (Ed) Manejo e conservação do solo e da água.* SBCS. Viçosa, MG, 2019. p. 193-249.

SOUZA, C. L. F.; OLIVEIRA, R. B.; MUSTAFÉ, D. N. *et al.* O cerrado como o “berço das águas”: potencialidades para educação geográfica. **Revista Cerrado**, v. 17, n. 1, 2019, p. 86-113.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C. *et al.* Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 256-265, 2012.

CAPÍTULO 12

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO CERRADO BRASILEIRO: ASPECTOS HISTÓRICOS E EVOLUÇÃO DO PAPEL SOCIOECONÔMICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Gerson Cardoso da Silva Junior
Eduardo Antonio Gomes Marques
Fernanda Caetano de Mattos Bastos Cunhaf

Resumo

O presente capítulo apresenta uma caracterização de aspectos geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos da região de abrangência do bioma Cerrado. O foco recai sobre os diferentes litotipos que compõem seu substrato rochoso e informações sobre aspectos hidrogeológicos, tais como aquíferos existentes, tipo de poros (granulares, fraturados e cársticos) e ao grau de confinamento (livres, semiconfinados e confinados), além de seu potencial como fornecedores de água para consumo humano (seja em pequenos ou grandes volumes), dessedentação animal e irrigação, dentre outros usos. As áreas de Cerrado em que ocorrem aquíferos das grandes bacias sedimentares compõem os aquíferos com maior capacidade de produção, cujo potencial de uso depende de uma melhor caracterização hidrodinâmica. Assim, apresentam-se os principais sistemas aquíferos que ocorrem na região do Cerrado, com destaque para o Sistema Aquífero Guarani (SAG), o Sistema Aquífero Parnaíba (SAP), os Sistemas Aquíferos Parecis e Araguaia/Bananal e o Sistema Aquífero Bambuí/Urucuia, e uma descrição geral de suas principais características hidrogeológicas. Por fim, apresenta-se um estudo de caso relativo ao Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia, tomando-se por base o estudo realizado por Leão *et al.* (2023), com foco em uma detalhada caracterização hidrogeológica e realização de simulações numéricas de porções mais restritas do SAU com elevada demanda de bombeamento para irrigação, visando simular seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica.

12.1 Introdução

Dentre os biomas brasileiros, o Cerrado talvez seja aquele que mais mudanças sofreu nas últimas décadas. Desde meados dos anos 1970, a contínua expansão da ocupação e a modificação do uso do território do Brasil central tem sido a tônica. O desenvolvimento de técnicas inovadoras, especialmente pela atuação da EMBRAPA, permitiu a expansão da agricultura em larga escala em solos que originalmente eram considerados de baixa qualidade ou improdutivos. Ainda, a implantação de uma malha rodoviária significativa, a partir da mudança da capital da república para Brasília, juntamente com as características fisiográficas favoráveis de parte significativa da área de ocorrência do bioma (relevo particularmente propício à mecanização agrícola, abundância de recursos hídricos e energéticos e clima apropriado) levaram a essa contínua modificação da paisagem.

O Cerrado é um bioma no qual, embora a ocupação humana seja milenar, as mudanças mais significativas datam de cerca de 200 anos, e as mais impactantes ocorreram praticamente somente nos últimos 50 a 60 anos. A ocupação e atividades

econômicas sustentáveis deram lugar a arranjos que estimularam a ocupação humana e mudanças do uso do solo em larga escala. Um aspecto de grande importância foi a expansão da atividade agroindustrial, a qual é totalmente dependente de uma disponibilidade segura e regular de recursos hídricos. Desse modo, em que pese sua enorme importância ambiental, encontra-se ainda pouco valorizado em termos de conservação.

Assim, a implantação de áreas de pastagem e, em décadas mais recentes, a agricultura em larga escala, foram os principais agentes dessa significativa transformação. Em particular, a mudança da capital do país para Brasília levou, como bem apontado pelo celebre pesquisador e geógrafo Aziz Ab'Sáber (Ab'Sáber, 1982) a “uma transformação acoplada do meio urbano e dos meios rurais, a serviço da produção de alimentos. As modificações na rede urbana do Brasil Central, forçadas pela implantação de Brasília atingiu todos os quadrantes regionais do domínio dos cerrados: o Triângulo Mineiro, Mato Grosso, sudoeste e centro de Goiás; e a rede urbana em reestruturação de Mato Grosso do Norte, na direção de Rondônia e a Amazônia.” Ainda segundo aquele autor, “o domínio dos chapadões recobertos por cerrados e florestas ciliares constitui um espaço físico ecológico e biótico, de primeira ordem de grandeza, com 1,9 milhões de quilômetros quadrados de extensão”.

Essa transformação, que se acelerou notadamente nas últimas três décadas, teve um impacto significativo sobre os recursos naturais da região, inclusive os mananciais hídricos superficiais e subterrâneos. Contudo, as mudanças sobre os aquíferos, suas reservas explotáveis, recarga e qualidade química ainda são, ainda que pese uma considerável falta de conhecimento hidrogeológico das regiões de ocorrência desse bioma, relativamente modestas na maior parte da extensão do bioma, em contraste com mudanças muito mais impactantes e visíveis no uso do solo, vegetação e mesmo quanto aos corpos fluviais.

O Cerrado brasileiro tem sido considerado, estrategicamente, importante para a ampliação de áreas para a produção de alimentos. Atualmente, a agricultura é a atividade que responde pelo maior percentual hídrico utilizado nas regiões de Cerrado, cerca de 70% do total. Esse domínio torna-se, portanto, alvo de disputas por parte das grandes empresas agrícolas, principalmente devido à sua rica hidrografia e por causa do seu clima sem grandes alterações, diferentemente do que ocorre em outras regiões brasileiras. E, também, com a recente expansão do setor sucroalcooleiro no Cerrado, no qual dezenas de usinas estão sendo construídas ou planejadas, torna-se necessário o desenvolvimento de mais estudos relacionados à dinâmica do uso e cobertura da terra e do seu impacto na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos.

Portanto, no presente capítulo será realizada uma revisão dos aspectos geológicos e hidrogeológicos na área de abrangência do bioma Cerrado, procurando mostrar um panorama geral da situação dos aquíferos ali presentes, de grande variedade de litotipos, reservas explotáveis, com boa qualidade química da água subterrânea e também quanto ao funcionamento hidrogeológico. Em seguida será apresentado o exemplo do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), importante corpo hídrico subterrâneo que abrange, em sua totalidade, seis estados, constituindo uma reserva hídrica de grande volume, com papel primordial na manutenção do fluxo de base na bacia do rio São Francisco e, economicamente, a água que mantém boa parte da excepcional produção agrícola do oeste baiano, compondo o mais importante polo agrícola daquele estado.

Conforme comentado nos parágrafos anteriores, as feições geológicas são muito diversificadas, heterogêneas, consistindo desde chapadões de rochas sedimentares e áreas

de relevo suave com estrutura geológica complexa sobre terrenos mais antigos. Esses terrenos geológicos, segundo o mestre Ab'Sáber (1982), podem assemelhar-se geomorfologicamente, sendo difícil por vezes a diferenciação na estruturação de paisagens físicas e ecológicas no domínio dos cerrados com respeito aos terrenos sedimentares. Essas formas de relevo são eventualmente entremeadas com serras e em que rochas mais competentes sustentam o relevo em *hogbacks* e *cuestas*. Há uma muito maior tipicidade – maior facilidade na diferenciação dos terrenos cristalinos e sedimentares - em outros domínios morfoclimáticos brasileiros, como a Mata Atlântica, por exemplo.

Do ponto de vista da associação de características ecológicas e geológicas, variações no tipo de vegetação são obviamente sublinhadas por mudanças litológicas, como por exemplo nas áreas de cristas quartzíticas e de xistos, em que há campos com vegetação rasteira ou mesmo praticamente inexistente, enquanto matas ciliares estão associadas a áreas aluvionares ou, em muitos casos, áreas de ocorrência de diques de diabásio, de menor resistência mecânica, formando áreas de vegetação mais densa e arbórea ao longo de seus eixos, mais deprimidos topograficamente. Uma feição comum no bioma são as veredas, que correspondem, em geral, ao predomínio de sedimentos arenosos nos bordos das planícies de inundação, frequentemente com o abastecimento de água de aquíferos mais profundos.

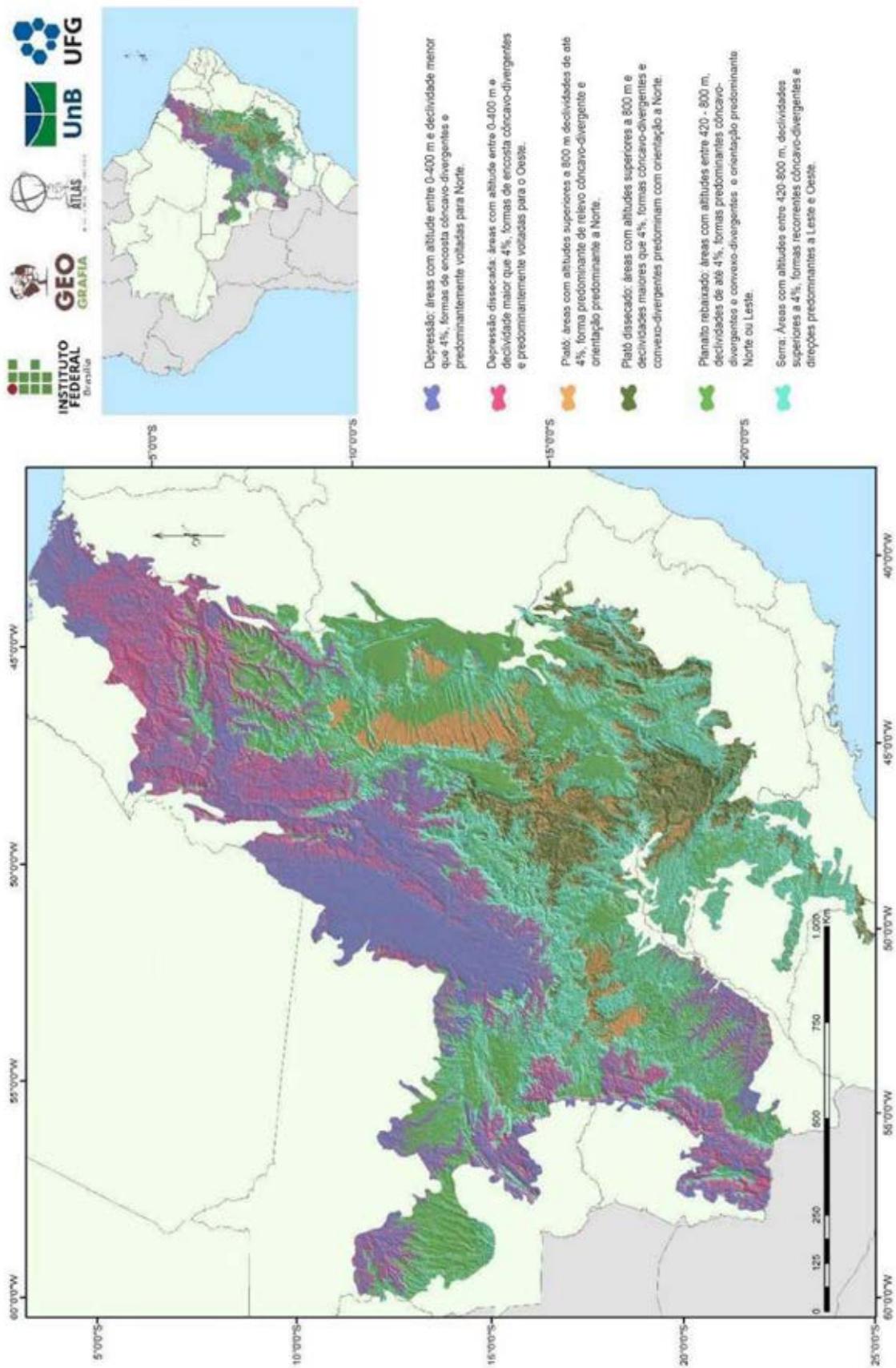
Enfim, as águas subterrâneas têm sido consideradas, cada vez mais e em todo o mundo, como uma alternativa para o abastecimento hídrico, para todos os usos (doméstico, irrigação agrícola, dessedentação animal etc.). Nem sempre, entretanto, a demanda pode ser atendida, seja por questões hidrogeológicas (tipo de aquífero, reservas disponíveis, recarga), como de outras naturezas (distância aos locais de consumo, dispositivos legais, áreas de reserva natural). Conhecer a sua distribuição e disponibilidade é fundamental para a gestão adequada em todo território, assim como no bioma Cerrado.

12.2 Contextualização

12.2.1 Geomorfologia do Cerrado

Rocha *et al.* (2022) representam a geomorfologia do Cerrado com um método semiautomático de classificação do relevo, considerando parâmetros métricos na definição e caracterização das unidades, resultando em um mapa geomorfológico com a definição de seis classes métricas do relevo (Figura 1). As principais feições morfológicas na área de ocorrência do Cerrado, segundo os autores são: a) os Platôs Dissecados (25% da área total), que correspondem a áreas quase planas, com altitudes entre 420 e 800 na parte leste e em toda porção sul do bioma; b) as Depressões, que se estendem de norte a sul na porção ocidental da área de estudo, principalmente no Tocantins e Mato Grosso, representando aproximadamente 24,5% da área total. As altitudes variam de 0 a 420 metros, com relevo suave; e c) Serras, domínio geomorfológico que está disperso em toda a área do Cerrado, mas particularmente concentrado na porção centro-sul, que compreende altitudes entre 420 e 800 m de altitudes e relevo por vezes íngreme.

Figura 1 - Mapa Geomorfológico do Cerrado



Fonte: Adaptado e traduzido de Rocha *et al.* (2022).

As demais unidades compreendem as Depressões e Platôs dissecados e os Platôs (Tabuleiros). Esses últimos têm grande importância econômica pois têm-se constituído na mais recente e ativa fronteira da agricultura mecanizada, pelas condições ótimas que reúnem para essa atividade, como altitude superior a 800 m, chuvas abundantes e terrenos planos, como os que ocorrem no oeste da Bahia, norte de Minas Gerais e sul de Mato Grosso (Figura 1).

Desse modo, o relevo da região do Cerrado caracteriza-se pela topografia plana ou relativamente plana, em virtude da grande ocorrência de chapadas, tabuleiros e planaltos. Em conjunto, representam quase metade da área total do Cerrado (IBGE; EMBRAPA, 2008 *apud* Souza *et al.* 2019). A topografia plana, associada às elevadas altitudes das chapadas, tabuleiros e planaltos e, em muitos casos, solos e formações geológicas arenosas, favorece a infiltração da água e propicia a ocorrência de importantes zonas de recarga ao aquífero.

12.2.2 Geologia do Cerrado

A relação do Cerrado com as litologias na Plataforma Sul-Americana envolve terrenos com idades desde o Arqueano até os períodos mais recentes do Terciário e Quaternário. O registro fóssil indica a presença de um cerrado “primitivo” desde o Cretáceo (145-65 milhões de anos atrás), e o subsequente soerguimento do Planalto Central no final deste período, associado a mudanças climáticas, de clima seco a mais úmido, favoreceu sua diversificação. A combinação desses dois aspectos com as alterações nas condições climáticas responde pelas diferentes fitofisionomias do Bioma, como resultado dos processos evolutivos associados às características locais pedológicas ou altitudinais (Barros *et al.*, 2020).

O Cerrado abrange, como visto, áreas que se estendem desde as planícies costeiras no norte do estado do Maranhão até as depressões dissecadas próximas à planície do Pantanal, no extremo sudoeste do bioma, ao longo de milhares de quilômetros. Desse modo, a geologia do Cerrado é bastante variada, compreendendo rochas do embasamento cristalino dos crátons amazônico e do São Francisco, materiais das faixas móveis/orógenos do Sistema Tocantins (Brasília, Araguaia, Paraguai e outros), além de materiais fanerozoicos das bacias sedimentares do Paraná e do Parnaíba, compreendendo um leque amplo de litotipos, ambientes deposicionais e condições de metamorfismo (Figura 2). Vai além do escopo do presente capítulo uma descrição detalhada de cada uma dessas unidades geológicas mas, em linhas gerais, das dez províncias tectônicas brasileiras seis estão situadas no bioma Cerrado. As províncias que compõem o substrato do Cerrado são as seguintes: Tocantins e Mantiqueira (Neoproterozoicas), bacias do Paraná e Parnaíba (Sedimentos Fanerozoicos), Tapajós, parte do cráton da Amazônia, e São Francisco (Crátons). A Província Tocantins ocupa a região nuclear do Cerrado, representando mais de 60%, enquanto as outras unidades estão situadas nas transições com outros biomas (Figura 2).

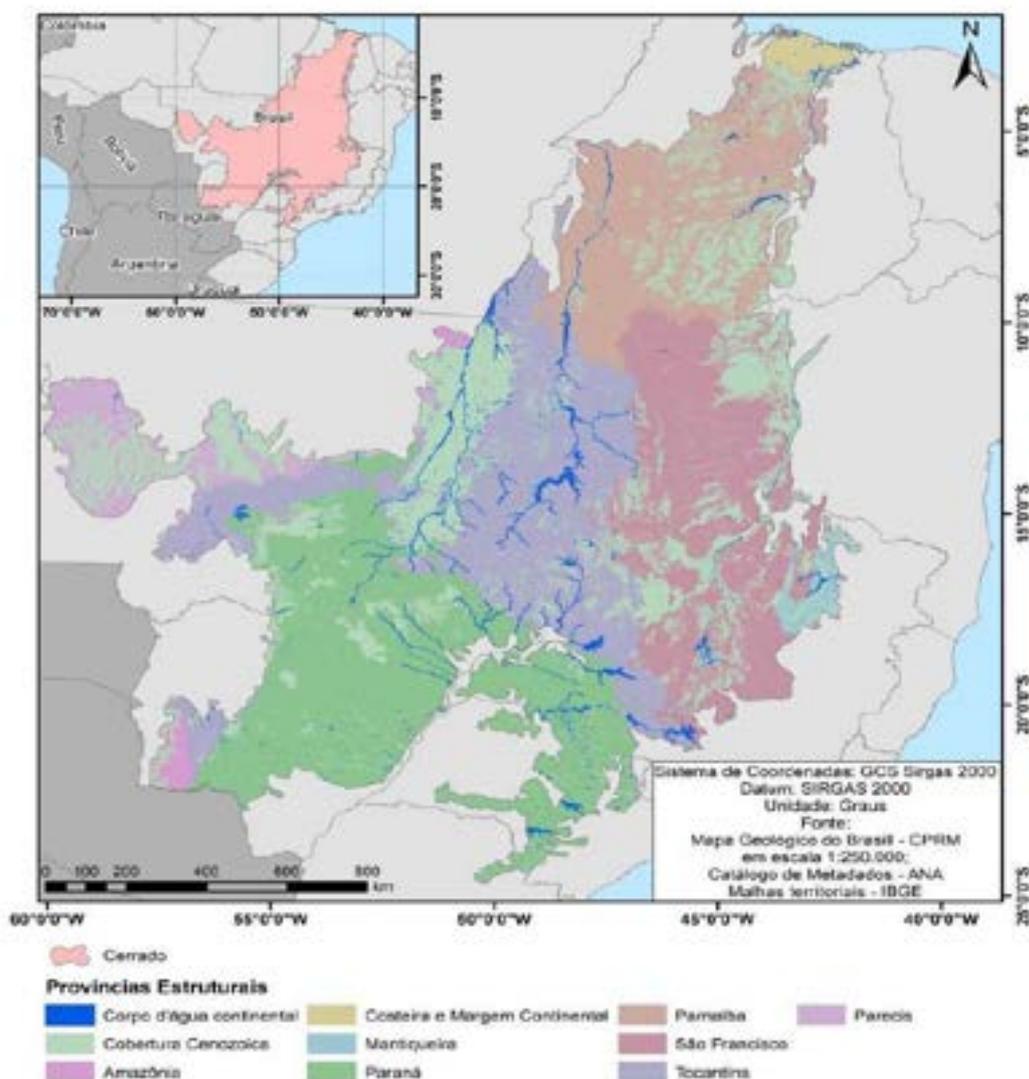
A Província Tocantins é constituída pelas faixas de dobramento Brasília, Paraguai e Araguaia, resultantes da convergência dos crátons do Amazonas (Amazônico), São Francisco/Congo e Parapanema, durante a Orogênese Brasileira (Silva, 2014). As rochas que ocorrem na Província Tocantins têm uma composição bastante variável. No setor leste desta província dominam rochas metassedimentares de composição pelítica (compostas por materiais onde dominam frações argila e silte), psamítica (compostas por fração areia ou maior) e carbonáticas. No setor central ocorrem grandes variações de tipos

petrográficos. Rochas metaígneas máfico-ultramáficas (ex. Maciço Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, Complexo Máfico-Ultramáfico de Itauçu-Anápolis) e ácidas (ex. granitos de Rubiataba) ocorrem adjacentes às rochas metassedimentares pelíticas.

No setor centro-oeste dominam rochas granito-gnáissicas entrecortadas por metabasitos, de composição básica. No setor noroeste dominam rochas metassedimentares de composição psamítica e pelítica. Essas variações de composição litológica condicionam os tipos de perfis de intemperismo da região, as características de fertilidade natural dos solos e as formas de relevo.

A Província Mantiqueira é um extenso cinturão de rochas que foi instalado na borda leste do Cráton do São Francisco/Rio de La Plata no final do Neoproterozoico/início do Paleozoico (Delgado *et al.*, 2003). Apesar de sua estruturação ser predominantemente marcada pela orogênese Brasiliana, esta província preserva remanescentes de rochas arqueanas, paleoproterozoicas e mesoproterozoicas. A sua estruturação é complexa e a interpretação não é consensual. Apenas uma pequena porção no extremo leste da área do bioma está situada nesta província.

Figura 2 - Províncias Geotectônicas do Brasil situadas na área do bioma Cerrado



Fonte: Os Autores (2023).

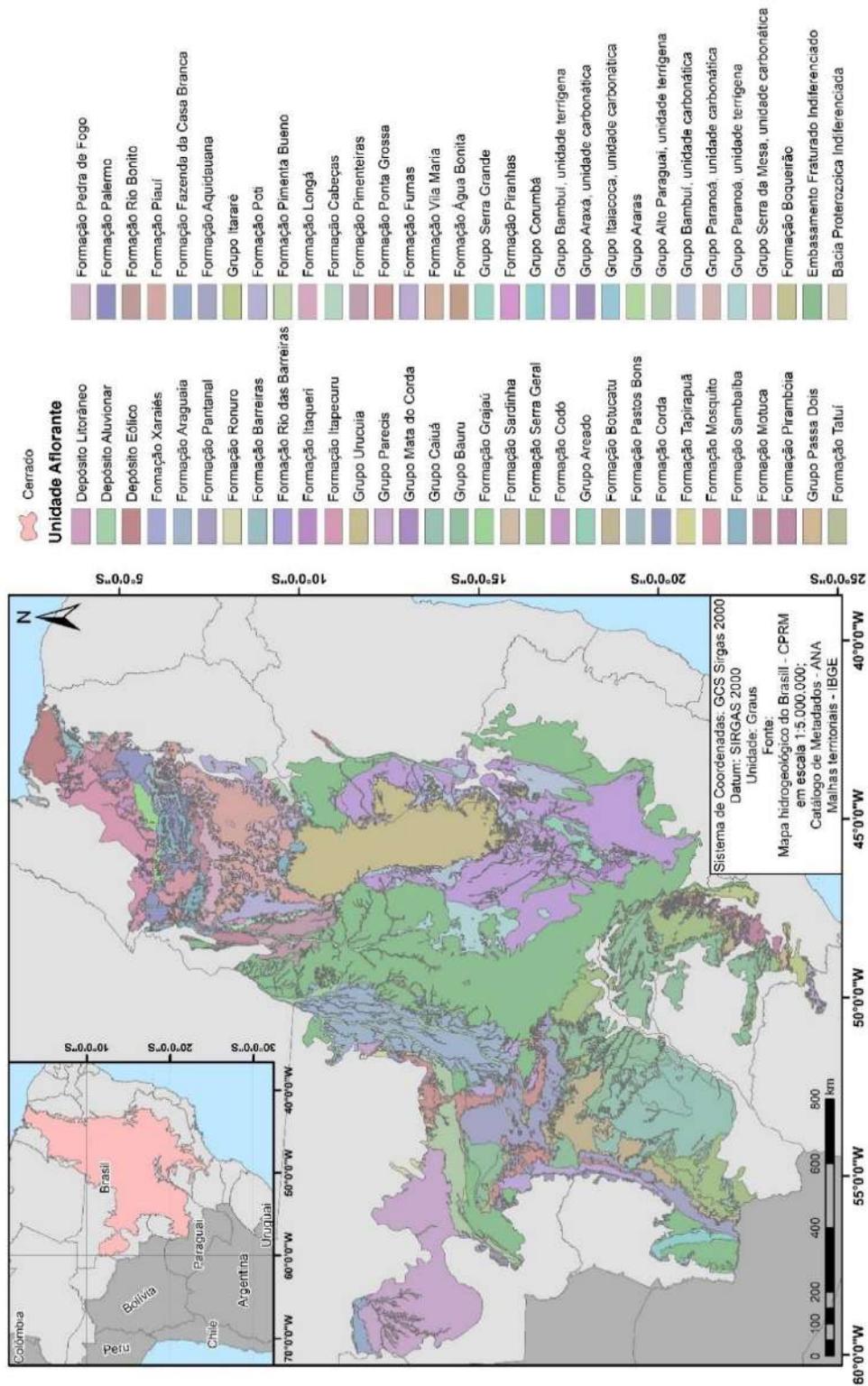
Na Bacia do Parnaíba o Cerrado, diferentemente do núcleo principal no Planalto Central, ocorre sobre rochas sedimentares, principalmente arenitos e rochas pelíticas que diferem principalmente quanto ao cimento predominantemente, que pode ser silicoso, ferruginoso ou carbonático. Essa região é designada região dos Cerrados Marginais do Nordeste. As feições geológicas e fisiográficas (solos, relevo e declividade do terreno) exercem um controle sobre as características hidrogeológicas, que por sua vez atuam como condicionadores da paisagem e do tipo de vegetação. Na região, é comum a presença de crostas lateríticas, ferruginosas, fortemente associadas às fitofisionomias do Cerrado na região, alterando-as segundo sua extensão, profundidade e estrutura (Barros; Castro, 2006).

Do mesmo modo, a Bacia do Paraná está localizada principalmente na região Sul e parte do Sudeste e Centro-oeste do Brasil, e estende-se a países vizinhos como Paraguai, Argentina e Uruguai. Abrange praticamente toda a porção sul/sudoeste do Cerrado. Eventos de extensão tectônica ocorridos nos períodos Ordoviciano, Carbonífero e Cretáceo proporcionaram a subsidência que levou à deposição das sequências sedimentares da Bacia do Paraná. O evento tectônico que ocorreu no Cretáceo resultou em derrames de rochas básicas que precederam a separação de Gondwana. Assim, dois terços de sua superfície estão cobertos por lavas basálticas (Milani & Thomaz Filho, 2000; Milani, 2004). As rochas que afloram na área de ocorrência do bioma Cerrado são em sua maioria variedades de arenitos das formações cretáceas da bacia, principalmente dos Grupos Caiuá e Bauru, embora secundariamente ocorram outros litotipos.

A Província do Tapajós (também designada como Tapajós-Parima) é parte do Cráton Amazônico e compreende uma faixa orogênica com direção NW-SE cujas idades isotópicas são pertinentes ao Paleoproterozoico. Em seu interior são reconhecidos dois domínios tectonoestratigráficos: Uatumã-Anauá, ao norte, e Tapajós, a sul. O Domínio Tapajós reúne terrenos granito-gnáissicos a localmente migmatíticos com idades em torno de 2,00 Ga. Assinala a articulação e história orogênica do Ciclo Transamazônico (metamorfismo e deformação). Esse cráton tangencia marginalmente a região do bioma Cerrado, constituindo pequenas franjas na sua borda ocidental.

Finalmente, o Cráton do São Francisco e suas coberturas neoproterozoicas e fanerozoicas constituem o restante da área de ocorrência do Cerrado, compreendendo toda a porção centro-oriental do bioma. O Cráton do São Francisco abrange principalmente os estados da Bahia e de Minas Gerais, e é a mais bem exposta e estudada unidade tectônica do embasamento da plataforma sul-americana (Barbosa *et al.*, 2003). A província cratônica do São Francisco (Figura 2) constitui um embasamento composto por núcleos microcontinentais arqueanos e faixas móveis paleoproterozoicas e mesoproterozoicas. O embasamento do cráton constitui um bloco estável antigo, de orientação norte-sul, aflorante em suas porções sul e nordeste. É formado por rochas antigas, arqueanas, e sequências supracrustais paleoproterozoicas, recobertas pela bacia Sanfranciscana. As rochas do Fanerozoico, que constituem as principais unidades aquíferas, serão o foco do item seguinte (ver o Grupo Urucuia, que compõe uma das Unidades litoestratigráficas do Cerrado na Figura 3) (Campos; Dardenne, 1997).

Figura 3 - Unidades litostratigráficas do Cerrado



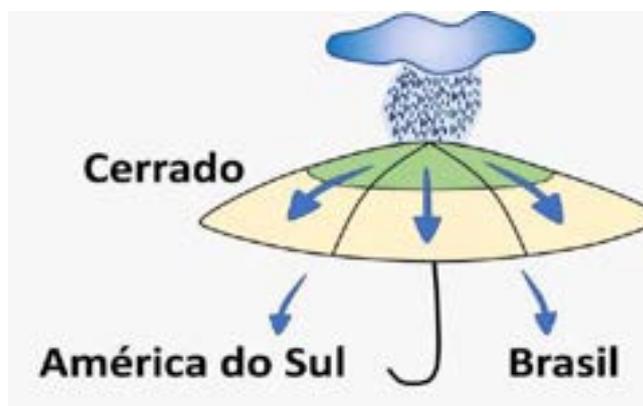
Fonte: Baseado em SGB (2010).

12.2.3 Hidrogeologia do Cerrado

O Cerrado tem sido apelidado de “berço das águas do Brasil” por diversos autores, como um modo de reconhecer a importância da área de ocorrência do bioma na distribuição e manutenção da água em todo o país. Nesse domínio encontram-se os principais divisores de água das bacias hidrográficas brasileiras. É inequívoca a importância hidrológica do Cerrado no contexto nacional e mesmo continental. Porém, para uma compreensão adequada é necessário realizar uma análise abrangente da potencialidade hídrica do domínio morfoclimático do bioma, com a avaliação de características como o relevo (já comentado anteriormente no texto), o clima, os tipos de solo e a vegetação (Souza *et al.*, 2019).

As seis principais regiões hidrográficas brasileiras têm, ao menos em parte, suas nascentes na área do Cerrado: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Parnaíba, São Francisco, Paraná e Paraguai. Em geral, os rios que cortam o Cerrado não têm grandes vazões, mas é onde ocorrem as nascentes das grandes regiões hidrográficas brasileiras. Também é onde se localizam alguns dos maiores aquíferos brasileiros, os Sistemas Aquíferos Guarani, Bambuí/Urucuia e Parnaíba, em parte responsáveis pela manutenção dos níveis de base desses rios. Por essa razão, Werneck *apud* Caldas (2013) denominou esse fenômeno de “efeito guarda-chuva” (Figura 4). De fato, a contribuição hídrica do bioma corresponde a cerca de 15% da vazão dos rios no Brasil, a maior sem considerar a Amazônia.

Figura 4 - Representação do Cerrado como o “Berço das Águas”



Fonte: Adaptado de Caldas (2013).

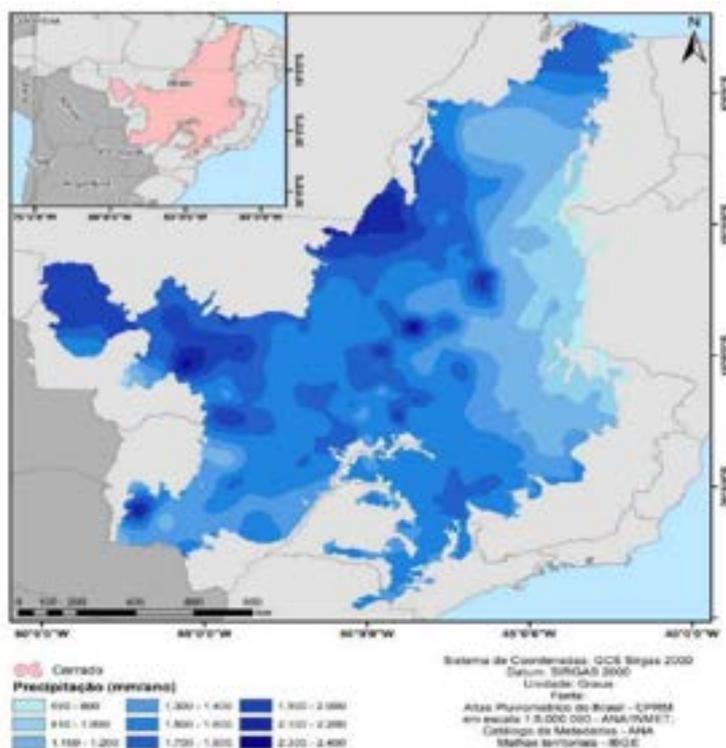
O tipo de solo do Cerrado, predominantemente laterítico, favorece a recarga aos aquíferos. Silva (2009) acrescenta que “as características dos latossolos predominantes nas áreas de topografia plana ou suave-ondulada fazem com que eles funcionem como esponja absorvedora de água que alimenta o nível freático”. Para o autor, a fisiologia e ecologia da vegetação também favorecem a disponibilidade de água no ambiente. Assim, o potencial e recarga de aquíferos rasos estão relacionados às coberturas inconsolidadas e solos. Os latossolos correspondem a 43% da área total do Cerrado, e os neossolos quartzarênicos a 20%. As áreas com maior favorabilidade para recarga são aquelas nas quais ocorrem os latossolos e neossolos quartzarênicos. A grande dimensão das ocorrências de solos permeáveis, associadas aos aspectos de relevo, vegetação e clima, reforçam a importância da região do Cerrado quanto à sua favorabilidade para a recarga dos aquíferos (Augusto; Campos *apud* Rodrigues, 2013).

A precipitação média anual na região do Cerrado apresenta, como característica típica do clima de savana, grande sazonalidade, concentrando-se na primavera e verão - de outubro a março. A precipitação pluviométrica anual varia de cerca de 800 mm na porção nordeste, passando a 1700 mm na porção sudeste do bioma, crescendo de modo geral para oeste, onde pode atingir valores acima de 2100 mm/ano próximo aos limites com o bioma da Amazônia, na porção noroeste do Cerrado (Figura 5). Desse modo, além da heterogeneidade já comentada dos aspectos geológicos e geomorfológicos, o Cerrado tampouco é um bioma homogêneo em termos climáticos.

Convém salientar o importante papel da cobertura vegetal para a infiltração da água no solo. A vegetação protege os horizontes superficiais do solo do impacto das gotas da chuva, atenuando a compactação e a erosão, podendo aumentar a macroporosidade do solo contribuindo com a quantidade de água disponível para recarga, além de evitar processos que dificultam a drenagem do solo. Entretanto, Pousa *et al.* (2019) comentam que a modificação ou supressão da vegetação não é tão aguda no efeito sobre a capacidade de infiltração no solo a ponto de reduzir a recarga, que pode diminuir, sim, mas por outros fatores como a compactação do solo pelo pisoteio ou trânsito de veículos e máquinas agrícolas.

O domínio dos cerrados possui drenagens perenes para os cursos d'água principais e secundários, envolvendo, porém, o desaparecimento temporário dos caminhos d'água de menor ordem de grandeza, por ocasião do período seco do meio do ano. Desta forma, coexiste uma perenidade geral para a drenagem dos cerrados, com um efeito descontínuo de intermitência sazonal para os caminhos d'água das vertentes e interflúvios, ao par com uma atenuação dos fluxos d'água nos canais de escoamento das pequenas sub-bacias de posição interfluvial (Ab'Sáber, 1982).

Figura 5 - Precipitação pluviométrica média do bioma Cerrado (mm/ano), no período 1960-2015



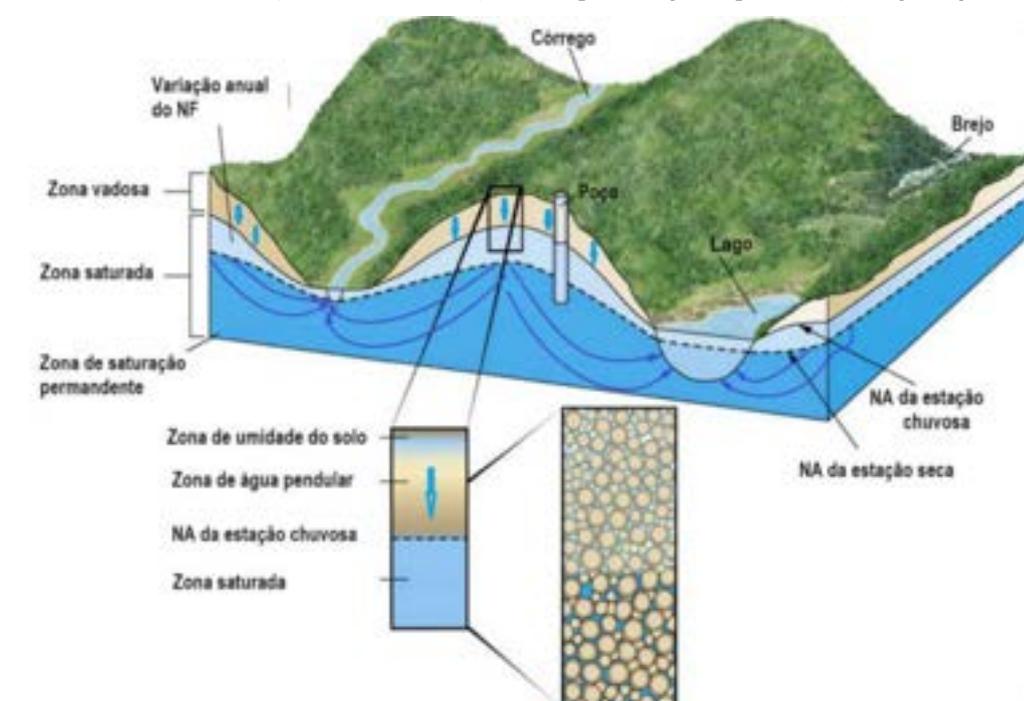
Fonte: INMET (2023).

Conforme comentado nos parágrafos anteriores, há uma grande diversidade de feições e unidades geológicas no Cerrado brasileiro, fator que, associado à variedade climática e geomorfológica, gera uma heterogeneidade na distribuição e volumes dos recursos hídricos, tanto superficiais quanto subterrâneos.

Sobre a contribuição dos recursos hídricos do Cerrado, Lima (2005) considera que esses possuem uma importância que ultrapassa as dimensões dessa região de vegetação típica, como as questões de abastecimento, indústria, irrigação, navegação, recreação e turismo. Somam-se a tais usos a forte representação das águas do Cerrado na geração de energia elétrica brasileira. Entre as principais finalidades do consumo das águas do Cerrado, destaca-se a irrigação. Ao mesmo tempo que a irrigação se converte paulatinamente no principal uso das águas do Cerrado, ela também é um dos problemas atuais, pois ao ser realizada de forma descontrolada, sem o manejo apropriado de utilização, colabora para uma série de impactos, que englobam várias outras questões prejudiciais ao Cerrado, como erosões, assoreamento dos cursos d'água e outros problemas ambientais (Souza *et al.*, 2019).

As águas subterrâneas encontram-se sob a superfície da Terra, preenchendo os poros existentes entre os grãos do solo, em rochas e ou em descontinuidades. A água, originária das chuvas, chega ao solo e infiltra-se desde a superfície, fluindo verticalmente pela zona vadosa ou não saturada, chegando após variados intervalos de tempo à zona saturada, na qual a água preenche todos os poros (MMA, 2007), e resultando em uma superfície freática ou piezométrica. Na zona saturada a água flui praticamente de modo sub-horizontal, e é a região em que ocorre a circulação, o armazenamento e a extração de água, normalmente através de poços que a intersectam (Figura 6).

Figura 6 - Bloco-diagrama esquemático do subsolo em um aquífero livre mostrando a relação entre as chuvas, a recarga através da zona vadosa no meio granular (setas azuis verticais), o fluxo na zona saturada (setas azuis escuras) e os corpos de água superficial (córrego, lago, brejo)



Fonte: Adaptado de Blanc e Newell (2003).

Os aquíferos dividem-se, quanto à constituição dos vazios através dos quais a água subterrânea percola (denominada como porosidade, ou seja, a relação entre o volume de vazios e o volume total da rocha), conforme Figura 7:

1) *aquíferos de porosidade granular*, em que a água está armazenada e flui entre grãos de solos, como ocorre em sedimentos inconsolidados ou rochas sedimentares, e ainda em alguns tipos de rochas metamórficas ou mesmo ígneas, como tufos vulcânicos e materiais piroclásticos. Esse tipo de aquífero é o mais utilizado mundialmente, especialmente pela população de baixa renda, e em muitas cidades e áreas rurais da região do Cerrado, é a principal fonte de água subterrânea para a população (Rodrigues, 2023);

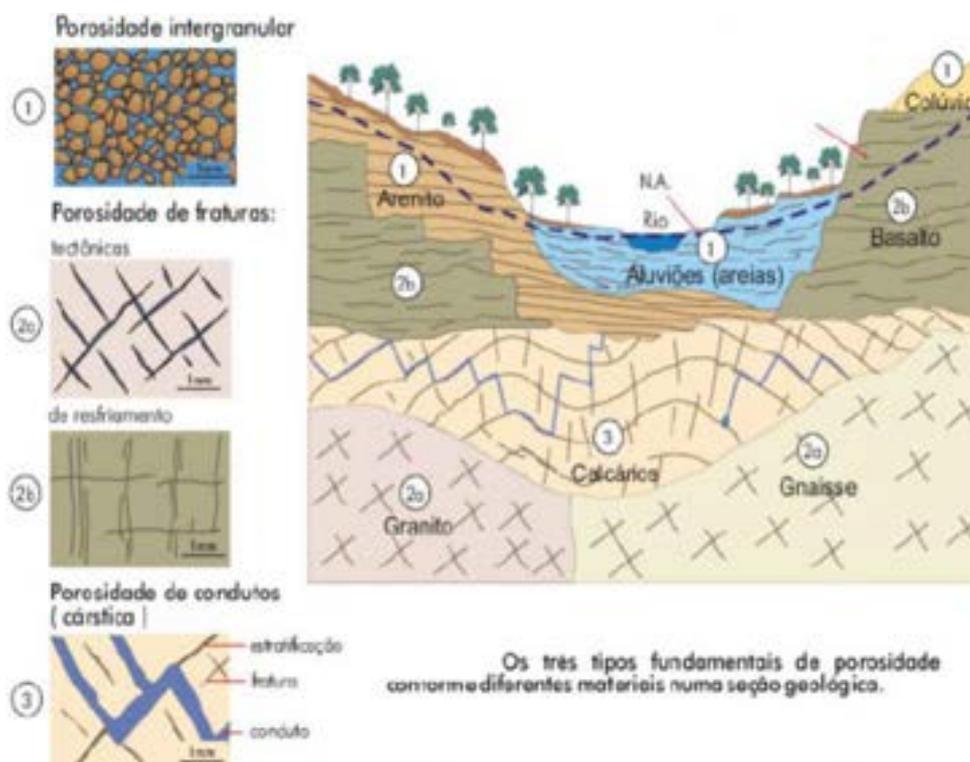
2) *aquíferos fraturados*, nos quais a água está armazenada nas fraturas (juntas, falhas, fissuras) ou microfraturas, aberturas nos maciços rochosos provocadas por esforços mecânicos rúpteis. Nessas rochas a porosidade é, em geral, bem menor que nas rochas com porosidade granular, ou seja, não constituem bons aquíferos. Isso resulta frequentemente em poços secos ou de baixas vazões (Feitosa e Manoel Filho, 1997); e

3) *aquíferos cársticos*, em que rochas, em geral de constituição carbonática, apresentam alargamentos das fraturas por dissolução das rochas, resultando em cavidades associadas a um relevo característico, com dolinas, sumidouros, cavernas e outras feições geomorfológicas.

Os aquíferos também podem ser rasos, como comentado nos parágrafos anteriores, em contato direto com a atmosfera, os chamados aquíferos livres; ou profundos, constituindo por vezes complexo arranjo de camadas confinadas por estratos de baixa permeabilidade. Isso tem implicações importantes na recarga, papel ecológico e importância econômica desses corpos hídricos.

Augusto e Campos *apud* Rodrigues (2013) salientam também que os aquíferos cumprem três funções ecossistêmicas importantes: filtro, regulação do fluxo, e reservação. A função de filtro é a capacidade de depuração de cargas contaminantes, como metais, organismos patogênicos e outras substâncias tóxicas. A função reguladora é o papel, crucial no Cerrado, de manutenção dos cursos de água superficiais e de ecossistemas relacionados durante o período sem chuvas, como no caso das veredas. Nesse caso a água que alimenta as nascentes e rios vem da descarga do aquífero, com a água acumulada no período das chuvas. A função de reservatório é desempenhada com o armazenamento da água retida nos poros. Como os tempos de trânsito são muito lentos nos aquíferos, e os volumes muito grandes, esse papel é fundamental na manutenção dos ecossistemas associados e na qualidade da água que flui pelas nascentes.

Figura 7 - Os três tipos de porosidade segundo os materiais constituintes e tipos de descontinuidade: granular ou intergranular; por fraturas e cárstica



Fonte: Teixeira (2007).

No Brasil, os recursos hídricos subterrâneos distribuem-se em amplos domínios, as províncias hidrogeológicas (Figura 8). Algumas províncias situam-se em zonas distantes das áreas de maior consumo, sem demanda significativa, tais como grandes cidades, polos agrícolas, zonas com recursos hídricos superficiais insuficientes. Isso resulta em um interesse estratégico menor, uma vez que a transposição de água subterrânea é, ao contrário do que ocorre com as águas superficiais, quase sempre inviável em grande escala.

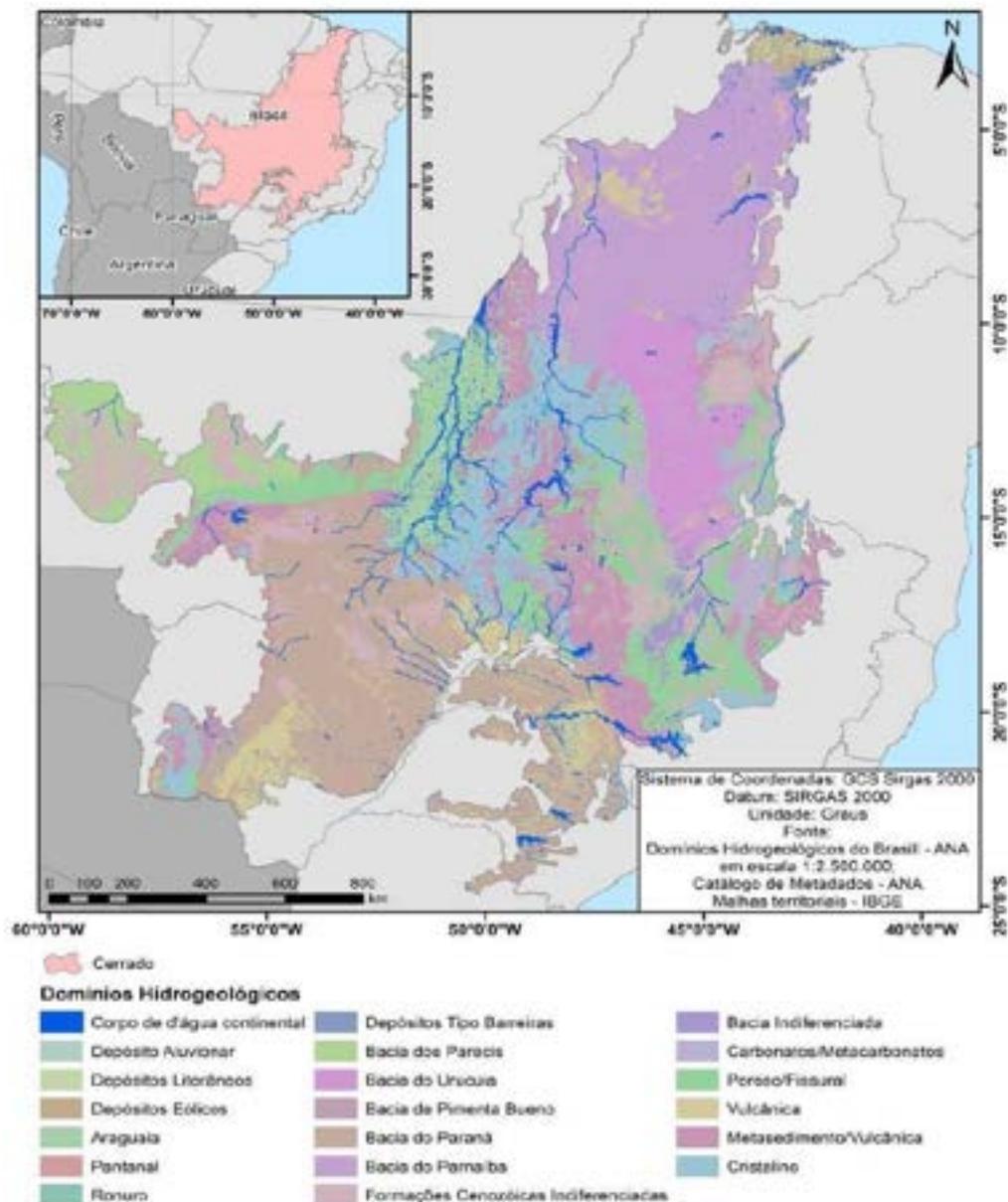
Em seu recente artigo sobre as águas do Cerrado, Souza *et al.* (2019) afirmam que as rochas sedimentares predominam em 57,97 % da área total do Cerrado apresentam porosidade granular predominante e podem ser classificadas como as de maior vocação aquífera. Essas rochas de porosidade granular são encontradas em escalas que variam de grandes bacias sedimentares até várzeas e veredas onde se acumulam sedimentos arenosos. Esses materiais sedimentares constituem os mais importantes aquíferos. Os autores também afirmam que os domínios hidrogeológicos de bacias sedimentares que ocorrem na área do Cerrado (Figura 8) correspondem a 43,89% da área total. Nessas áreas ocorre particular abundância e perenidade dos cursos de água superficiais, haja vista que são importantes mantenedores da vazão em cursos de água superficiais pelo fluxo de base, possibilitando a existência de vazão mesmo durante a época da seca.

Augusto e Campos *apud* Rodrigues (2013) trazem números semelhantes, afirmando que, na região do Cerrado, os aquíferos granulares ocupam 60% da área superficial, com 38% para os materiais fraturados e nos 2% restantes afloram os materiais cársticos (Figura 9). Evidentemente esses números referem-se à superfície aflorante sendo que, particularmente no caso das bacias sedimentares, os aquíferos

podem-se dispor em camadas até grande profundidade (centenas ou mesmo milhares de metros em alguns casos) o que levou os referidos autores a dividirem adicionalmente os corpos hídricos subterrâneos em aquíferos rasos e profundos.

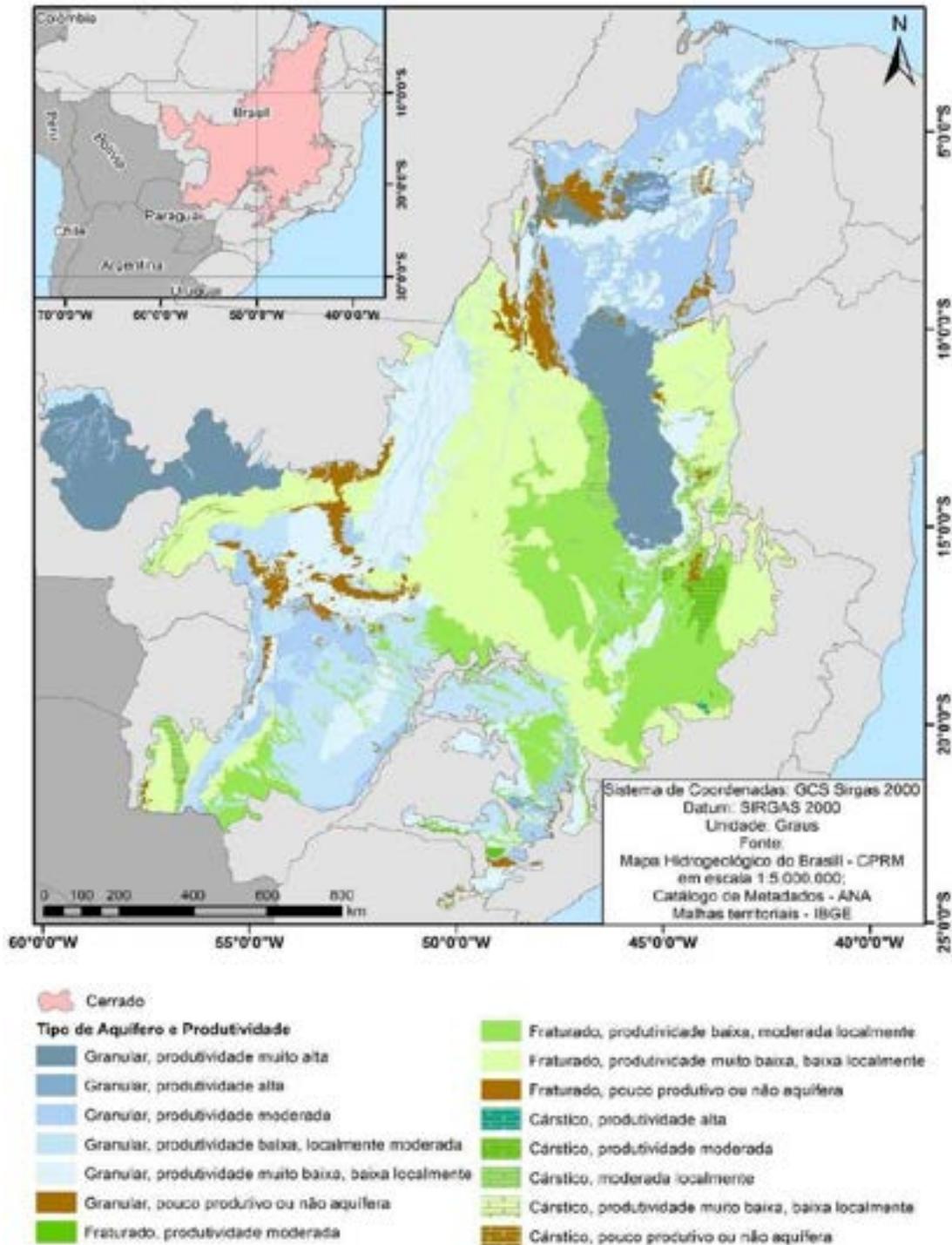
Assim, solos e sedimentos inconsolidados pouco espessos e subsuperficiais seriam os aquíferos rasos e formações geológicas com profundidades superiores a 50 m representariam os aquíferos profundos. Já os aquíferos fraturados, de potencial hídrico restrito, não apresentam viabilidade para uso em irrigação ou intensivo. Deve-se mencionar que os aquíferos podem ocorrer sobrepostos uns aos outros, sendo que um exemplo que ilustra essa situação são as rochas cársticas do Grupo Bambuí e do Embasamento Cristalino, sobrepostos pelos arenitos do Sistema Aquífero Urucua (SAU), em diferentes áreas, sendo esse sistema aquífero objeto específico do item seguinte.

Figura 8 - Províncias (domínios) hidrogeológicas do Cerrado brasileiro



Fonte: Os Autores (2024).

Figura 9 - Aquíferos do Cerrado segundo o tipo de porosidade: granular, fraturado ou cárstico



Fonte: Os Autores (2024).

É importante salientar que, embora com volumes e possibilidades limitadas para uso em agricultura irrigada, os aquíferos rasos são fundamentais para a recarga dos aquíferos profundos e na regularização das vazões dos cursos de água superficiais, como veredas, rios e lagos (Augusto; Campos *apud* Rodrigues, 2013). Esses aquíferos também são importantes fornecedores de água para residências e pequenas propriedades rurais.

Os aquíferos das grandes bacias sedimentares que ocorrem no Cerrado, que são, em geral, de grande profundidade, multicamadas, são os de maior potencial para uso na agricultura irrigada. Contudo, o potencial de uso depende das características hidrogeológicas (parâmetros físicos) das rochas que os compõem. Desse modo, os aquíferos com grandes volumes armazenados e maior disponibilidade hídrica ocorrem no Cerrado em áreas determinadas por essas características mencionadas.

12.2.4 Os Grandes Aquíferos Brasileiros e o Cerrado

No âmbito do Cerrado ocorrem alguns dos grandes sistemas aquíferos sedimentares brasileiros, como: o Sistema Aquífero Guarani e aquíferos associados (Grupo Bauru/Caiuá) na Bacia do Paraná, denominados em conjunto como a Província Hidrogeológica do Paraná; o Sistema Aquífero Parnaíba, composto por várias unidades aquíferas aflorantes no bioma, descritas nos parágrafos a seguir; e os Sistemas Aquíferos Parecis e Araguaia/Bananal, na porção oeste do bioma. O Sistema Aquífero Bambuí/Urucuia, respectivamente nas bacias sedimentares Sanfranciscana e do São Francisco, será descrito no próximo item e encontra-se inteiramente situado no bioma Cerrado (Figura 10). Assim, os aquíferos mais importantes do Cerrado estão relacionados a grandes bacias sedimentares que coincidem com as áreas hidrogeologicamente mais favoráveis: do Paraná, Bacia do Parnaíba, dos Parecis, Araguaia e Sanfranciscana/do São Francisco.

Na Bacia Sedimentar do Paraná, o Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos mais importantes sistemas aquíferos do planeta, ocupando uma área total de cerca de 1,2 milhões km² predominantemente na bacia hidrográfica do Paraná e em bacias vizinhas. Abrangendo os Estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o Sistema Aquífero Guarani tem boa parte de sua área no domínio do Cerrado.

Figura 10 - Sistemas aquíferos do bioma Cerrado



Fonte: Augusto e Campos *apud* Rodrigues (2013).

O SAG constitui importante reserva estratégica para o abastecimento da população, atividades econômicas e funções ecológicas. A recarga anual é de cerca de 160 km³/ano, sendo que cerca de 25% desse volume constituem o assim considerado potencial explorável do SAG, sem riscos de sobreexploração do sistema aquífero. As águas em geral são de boa qualidade para o abastecimento público e outros usos, sendo que, em sua porção confinada, os poços têm até 1500 m de profundidade e podem produzir vazões superiores a 700 m³/h.

Contudo, o SAG aflora em áreas restritas no Cerrado, podendo evidentemente ser aproveitado através de poços profundos, já que na maior parte da área está recoberto pelo Grupo Serra Geral (derrames de rochas basálticas) e por formações mais recentes, como o Grupo Bauru. A maior unidade aflorante na Bacia do Paraná corresponde justamente aos arenitos do Grupo Bauru e Caiuá (Sistema Aquífero Bauru-Caiuá – SABC). O Aquífero Bauru é um aquífero predominantemente livre, constituído por arenitos com grandes valores de armazenamento livre na maior parte de sua ocorrência, e excelentes condições de infiltração e recarga (Prandi, 2010). Em algumas regiões, como no Triângulo Mineiro, as condições hidrogeológicas favoráveis proporcionam vazões médias superiores, o que favorece seu uso para irrigação de lavouras de café.

Na Bacia Sedimentar do Parnaíba ocorre uma sobreposição de vários subsistemas aquíferos denominados como Sistema Aquífero Parnaíba (SAP). O bioma Cerrado ocorre em cerca de 60% da área da Bacia. As reservas hídricas estimadas para o SAP, considerando somente as unidades aflorantes (Codó, Itapecuru, Corda, Motuca, Pedra de Fogo, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande), e tomando como base os dados de poços tubulares disponibilizados pelo sistema SIAGAS/SGB e da Agência Nacional de Águas (2017), totalizando cerca de 6000 poços, chegam a cerca de 6700 km³, dos quais 3800 km³ (57%) no Cerrado. Esses volumes desconsideram os aquíferos confinados mais profundos, com muito baixa renovação hídrica, que também podem ser explorados através de poços muito profundos, de até mais de 1000 m de extensão total.

Os corpos hídricos subterrâneos mais importantes e explorados da Bacia do Parnaíba são os Aquíferos Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí, compostos basicamente por arenitos, com grandes espessuras e boa produção hídrica. Os Aquíferos Serra Grande e Cabeças são predominantemente confinados, sendo conhecidos os espetaculares poços jorrantes dessas unidades, como no Vale do Gurguéia (Piauí). Contudo, o Aquífero Poti-Piauí é o que apresenta os maiores volumes renováveis no Sistema Parnaíba na área do bioma Cerrado.

O Sistema Aquífero Araguaia-Bananal coincide com a bacia sedimentar homônima, dentro da bacia hidrográfica do Rio Araguaia, em Mato Grosso, Goiás e Tocantins. Topograficamente são planícies, lagunas e zonas alagadas intermitentes e vários cursos de rios meandrantos (Rio Araguaia e afluentes). Essa bacia é a menos promissora, pela relativa pequena espessura de sedimentos (cerca de 50 m). Há poucos dados hidrogeológicos, mas os que existem indicam baixas capacidades produtivas dos poços; em geral é um aquífero livre com importante função ecossistêmica e relativamente baixas reservas exploráveis, com pouco mais de 100.000 km² de área, quase toda no Cerrado.

O Sistema Aquífero Parecis (SAP) é um grande aquífero poroso granular, composto por camadas de arenitos intercalados com camadas pelíticas do Grupo Parecis. Os aquíferos podem ser livres ou confinados, dependendo da configuração geométrica local. A área total do SAP é de 227.000 km², com cerca de 50% na área do Cerrado. A reserva permanente no Cerrado alcança cerca de 1372 km³ (Augusto; Campos *apud* Rodrigues, 2013).

Finalmente, o conjunto de aquíferos que compõem a Bacia geológica do São Francisco e a Bacia Sanfranciscana, que a sobrepõe em boa parte de sua área de ocorrência, são outros importantes sistemas aquíferos do bioma Cerrado. O mais importante corpo hídrico subterrâneo, em termos de volumes armazenados e disponíveis para utilização nessa área é o Sistema Aquífero Urucuia, que será discutido em detalhe a seguir.

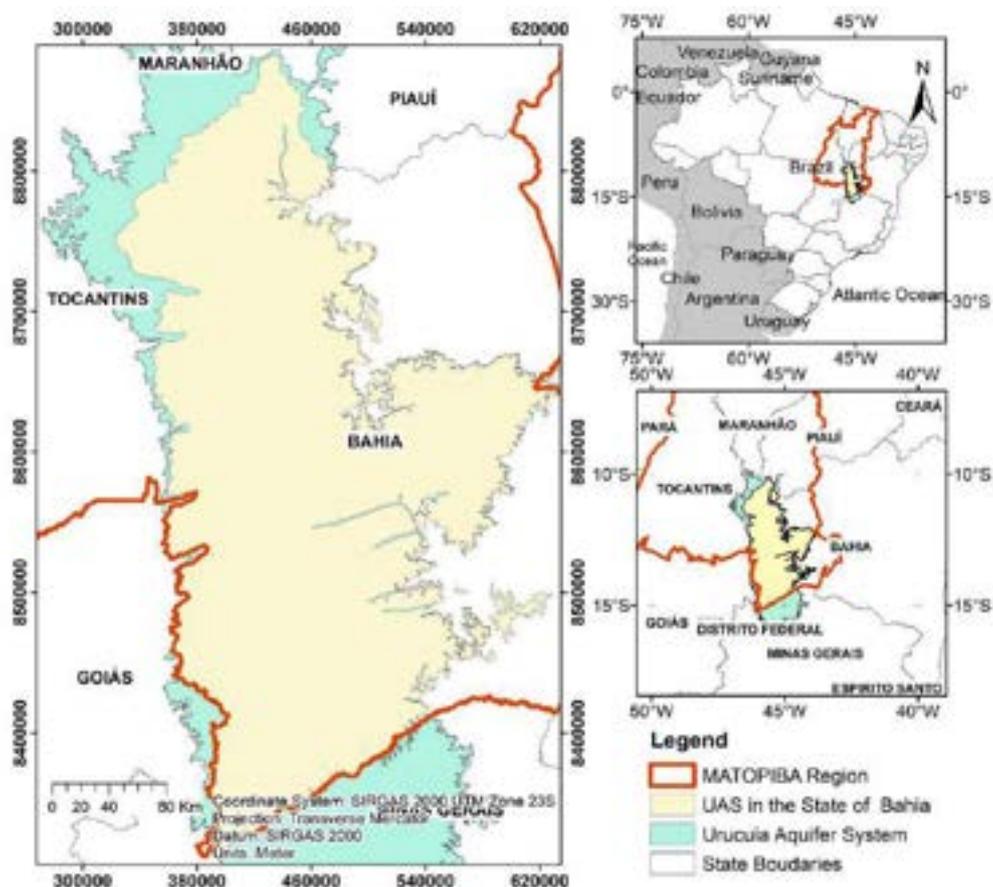
Os volumes utilizáveis dos aquíferos dependem do volume armazenado e de sua recarga. Essa utilização deve obedecer a critérios restritos, a fim de garantir seu uso sustentável. Para evitar a sobreutilização do aquífero, estudos devem ser realizados previamente a seu uso em larga escala, de modo a subsidiar as autoridades responsáveis (no caso da água subterrânea os órgãos ambientais estaduais, em conjunto com a esfera federal, conforme o caso). Desse modo, um exemplo de estudo realizado em um grande aquífero do Cerrado, por equipes da Universidade Federal de Viçosa e da Universidade Federal do Rio de Janeiro, a fim de subsidiar seu uso sustentável na agricultura irrigada é apresentado a seguir.

12.3 Estudo de Caso: O Sistema Aquífero Urucuia no Estado da Bahia

A região do MATOPIBA, que inclui as áreas de ocorrência do bioma Cerrado nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, compreende territórios onde a topografia e o clima favoreceram o desenvolvimento da agricultura em grande escala. Esta região se destaca como uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, principalmente no oeste do estado da Bahia (Figura 11). Essas regiões ocidentais da Bahia experimentaram uma importante expansão nas últimas décadas, tornando-se a principal fronteira agrícola do estado e um dos mais importantes do Brasil. O estado é hoje um grande produtor nacional de soja, milho, algodão, café e frutas (Donagemma *et al.*, 2016). Este processo levou a mudanças substanciais no uso da terra desta região, criando uma intensa exploração de recursos hídricos (Oliveira *et al.*, 2019).

O Sistema Aquífero Urucuia – SAU (Figura 11), cuja maior parte da área de ocorrência está no oeste da Bahia (SAU-BA), é um dos maiores e mais relevantes sistemas aquíferos do país em extensão areal, volumes armazenados disponíveis e, desde algumas décadas, um dos mais importantes em termos econômicos.

Figura 11 - Limites do Sistema Aquífero Urucuia na Bahia (SAU-BA, em amarelo) e do MATOPIBA



Fonte: Eger *et al.* (2021).

O SAU é um corpo aquífero em geral livre, com área de 126.468 km², abrangendo partes dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí, Goiás, Minas Gerais e Bahia (SAU-BA), esta última compreendendo a maior parte da área do SAU, com 82.000 km² (ANA, 2017).

O embasamento da bacia Sanfranciscana na área de estudo é formado por calcários da Formação São Desidério, do Grupo Bambuí, de Idade Proterozoica. O Grupo Neocretáceo Urucuia é composto, da base ao topo, por unidades que marcam a variação de um ambiente eólico para um ambiente fluvial (Alkmim; Martins-Neto, 2001). Desse modo, são as unidades neocretáceas que formam o SAU, divididas entre a Formação Posse na base, subdividida em duas litofácies: eólica e fluvial com influência eólica; e a Formação Serra das Araras, que ocorre na parte superior do Grupo Urucuia, caracterizada como um ambiente fluvial entrelaçado, com sedimentos de areia e leitos de cascalho, e grande variação de vazão (Campos; Dardenne 1997).

Historicamente, o volume de precipitação no oeste da Bahia varia de 900 a 1450 mm por ano, com aumento gradual de leste a oeste. Vale ressaltar que houve uma queda de cerca de 12% no volume anual de precipitação nas últimas décadas (Pousa *et al.*, 2019). As estações seca e chuvosa são bem definidas na região, com precipitação normalmente variando de 0 a 10 mm por mês no auge da estação seca (junho, julho, agosto) até cerca de 150 - 200 mm por mês no pico da estação chuvosa (dezembro e janeiro). Assim, esse extraordinário reservatório de água, com importância fundamental

para atividades econômicas e como alicerce dos ecossistemas do bioma Cerrado está, como toda hidrosfera, sujeito a variações climáticas que impõem períodos de seca os quais, segundo os dados mais recentes indicam, serão mais frequentes e acentuados até o final do presente século.

Desse modo, são crescentes as preocupações sobre os efeitos potenciais dessas secas sobre os níveis de água dos aquíferos, fontes e rios. O SAU é formado pelas rochas sedimentares do Grupo Urucua, pertencentes à Bacia geológica Sanfranciscana (Gaspar, 2006). Rios no domínio SAU no oeste da Bahia são conhecidos por terem caráter efluente, com média contribuição das águas subterrâneas para a descarga do rio de 89% - 95% anualmente (Gonçalves *et al.*, 2017), tendo grande importância por contribuir com uma percentagem estimada de 36% da vazão total anual do rio São Francisco (Vieira, 2021). Contudo, apesar do exposto, até poucos anos atrás praticamente não havia estudos significativos sobre o conhecimento de seu potencial hídrico, mecanismos de recarga, funcionamento hidrogeológico, fluxos e aspectos hidrogeoquímicos.

O SAU-BA pode ser subdividido em áreas com características de aquífero livre, aquífero suspenso local, semiconfinado ou confinado e aquífero freático raso a profundo (Gaspar; Campos, 2007). Apresenta um divisor de fluxo hidrogeológico com direção aproximada N - S, paralelo à fronteira do estado da Bahia com o Tocantins, drenando o fluxo de água subterrânea entre a bacia do rio Tocantins a oeste e em direção à Bacia do rio São Francisco a leste do eixo divisor. As áreas com confinamento e características de semiconfinamento podem ser explicadas pela existência de camadas de arenito silicificado nas formações Posse e Serra das Araras. O SAU-BA tem uma alta capacidade de produção, com poços de vazões superiores a 500 m³/h em algumas porções.

O Oeste da Bahia é geomorfologicamente caracterizado por um extenso planalto em que a recarga ocorre através de chuvas de alta intensidade, e vales escavados onde ocorrem descargas para os rios. A superfície potenciométrica geralmente tem configuração semelhante à superfície topográfica, com o fluxo de água subterrânea ocorrendo de oeste para leste (ANA, 2017). A espessura do SAU-BA é objeto de constante debate e controvérsia, devido aos diferentes resultados obtidos, variando de 350 a 600 m segundo a fonte.

Quanto à Hidrogeologia, cabe citar que houve estudos pioneiros e relevantes realizados em áreas específicas do SAU-BA, como os de Schuster (2002) e o estudo coordenado pela antiga Superintendência de Recursos Hídricos da Bahia (SEA – BA), para quantificação dos recursos hídricos subterrâneos e modelagem do SAU-BA. Alguns estudos locais têm sido desenvolvidos desde o início da década de 2000. Dentre os trabalhos com enfoque hidrogeológico, menos comuns, deve-se destacar os desenvolvidos por Gaspar (2006) em sua pesquisa doutoral, e os de Gaspar *et al.* (2012), Amorim Jr. e Lima (2005), Bonfim e Gomes (2004), Gaspar e Campos (2007), Barbosa (2016). Vários trabalhos buscam descrever a hidrogeologia a partir de elementos de levantamentos geofísicos, como os de Barbosa *et al.* (2014), Nascimento (2003) e Nascimento e Lima (2013). Também, iniciou-se um ciclo de trabalhos que buscam, por meio de simulações numéricas, obter *insights* sobre o funcionamento do SAU, suas reservas utilizáveis, recarga e outros elementos com o fito de fornecer subsídios para a gestão do Sistema (ANA, 2017; Gonçalves; Chang, 2017; Engelbrecht; Chang, 2015).

No primeiro esforço abrangente para minimizar o vácuo de conhecimento hidrológico e hidrogeológico do SAU, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017)

realizou um estudo sobre as características hidrogeológicas e de vulnerabilidade deste Sistema e do Sistema Aquífero Areado, localizado ao sul, em Minas Gerais, como passo inicial para a proposição de um modelo de gestão integrada e compartilhada entre as esferas federal e estaduais. Esse estudo inclui relatórios temáticos de Hidrogeoquímica, Geofísica, Recarga ao aquífero e Hidrologia superficial, e inclui um modelo hidrogeológico numérico de fluxo do SAU, constituindo o primeiro esforço sistemático para conhecimento técnico-científico desse sistema aquífero.

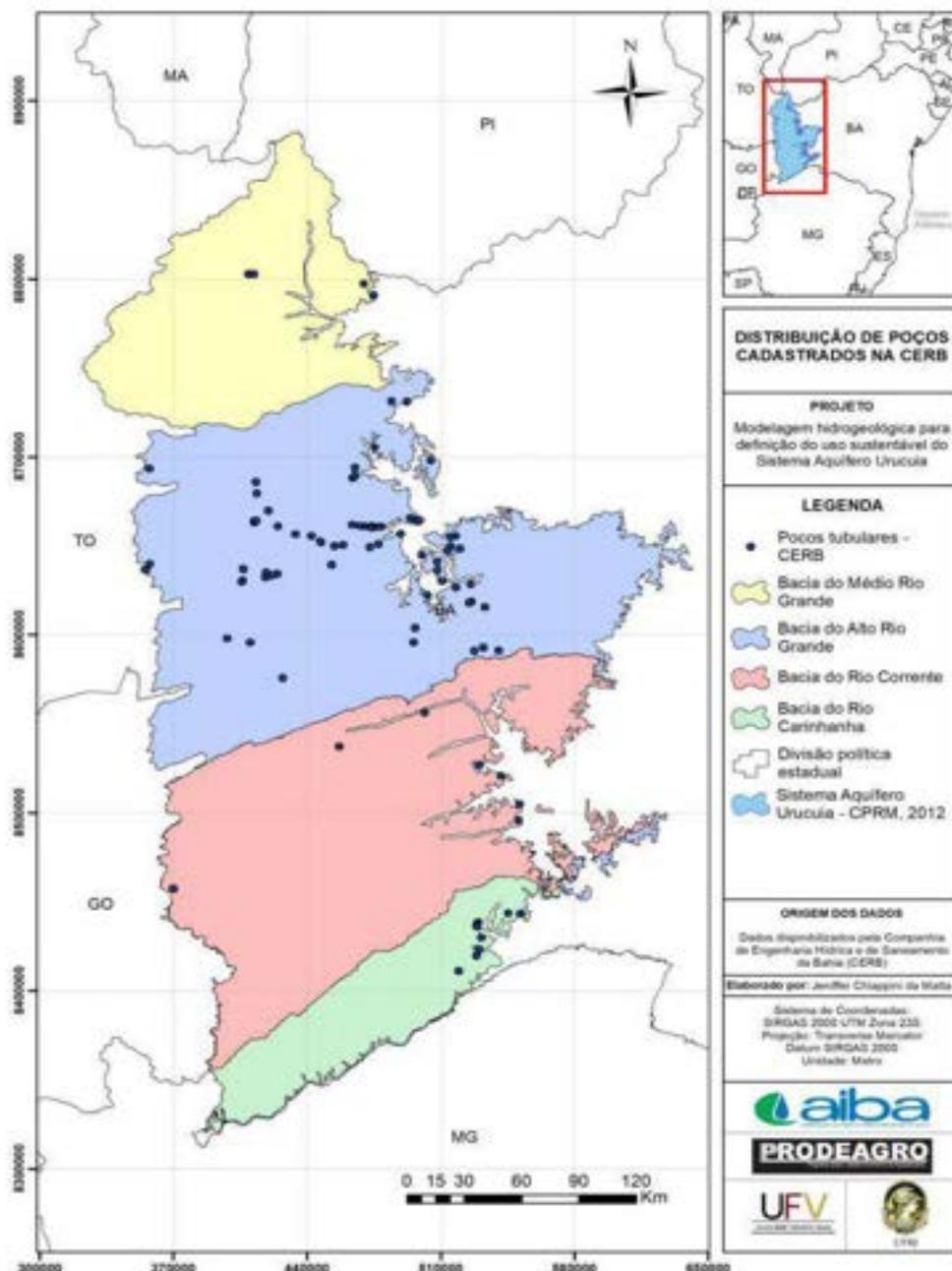
Posteriormente, para proporcionar uma compreensão adequada sobre os mecanismos de funcionamento do SAU-BA quanto à recarga, circulação de água e volumes disponíveis, respostas ao *stress* imposto por bombeamentos, modificações no uso do solo (incluindo desmatamentos), períodos de seca e outros, Mantovani *et al.* (2019), realizaram estudos que envolveram o aprofundamento dos estudos iniciais da ANA, com o desenvolvimento e calibração de um modelo matemático de fluxo da água subterrânea do SAU baiano. O modelo numérico tridimensional de fluxo desse estudo foi elaborado com o *software* Visual Modflow 4.6, um dos códigos matemáticos para simulação de fluxo de água subterrânea mais empedado em nível mundial. Esse *software* permite determinar a água subterrânea disponível, auxilia na avaliação da situação atual e tendências futuras e permite definir de estratégias de planejamento do uso e gestão das águas subterrâneas. Além disso, funciona como uma fonte integrada de informações sobre o aquífero podendo, com treinamentos dirigidos a clientelas variadas, desde muito simples até o nível de especialista, servir como ferramenta auxiliar à gestão, desde o nível de usuário final até as agências e organismos de controle, como órgãos ambientais estaduais, associações de usuários, ANA e outros.

A abordagem usada no desenvolvimento do modelo envolveu a divisão do SAU-BA em quatro subáreas de trabalho, obedecendo as bacias hidrográficas fluviais daquele setor, a saber (Figura 12); bacia do rio Grande, do rio Corrente e do rio Carinhonha (esta última somente a porção da bacia localizada no estado da Bahia, já que parte da bacia está em Minas Gerais).

Em algumas áreas do SAU-BA a produção dos poços está ligada à exploração de águas subterrâneas armazenadas no sistema clástico-fissural do Bambuí e nos aquíferos cristalinos. O SAU-BA representa o principal manancial subterrâneo do oeste baiano, uma região de grande importância pois é considerada a nova fronteira agrícola da Bahia, com taxas crescentes de produtividade nos últimos anos, na qual os recursos hídricos subterrâneos têm importante papel na produtividade e sustentabilidade do agronegócio local (Campos *et al.*, 2010).

A importância estratégica do SAU fundamenta-se não somente pelas crescentes demandas de água, mas também pela sua função de regulador das vazões dos afluentes da margem esquerda do médio rio São Francisco, já que cerca de 30% (período chuvoso) a 80% (período seco) das vazões desse rio são suportadas por seus afluentes que nascem no sistema, com uma média anual de 40% da vazão total (ANA, 2017). De modo geral, as drenagens que correm sobre o Urucuia são perenes, havendo uma forte contribuição da água subterrânea na composição do fluxo total anual dos rios locais, que chega a 100% nos meses de estiagem.

Figura 12 - SAU-BA e Sub-bacias do Médio Grande, Alto Grande, Corrente e Carinhanha, do norte para o sul



Fonte: Mantovani *et al.* (2019).

Recentemente, a CPRM propôs e definiu um programa de implantação de uma rede de monitoramento integrado de águas subterrâneas para diversos aquíferos do Brasil, denominada RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas). Especificamente para o SAU implantou-se uma rede de monitoramento composta, ao final de 2023, por 63 poços com *dataloggers* instalados e em operação de coleta e armazenamento de dados de profundidade de níveis estáticos, em intervalos de hora em hora, desde 2012 (a partir de 2011 para alguns poços). Esses dados são utilizados para avaliar a variação do NA ao longo do período monitorado.

Mesmo com todos os dados já obtidos e considerando o fato de que a região mais bem monitorada no Brasil pela RIMAS é o SAU-BA, o conhecimento do Sistema Aquífero Urucuia ainda é limitado. Estudos subsequentes, alguns presentemente em andamento, tem auxiliado a minorar essas incertezas. Dentre esses trabalhos, destaca-se o de Eger *et al.* (2021). Segundo esses autores, nos últimos 30 anos o aumento da procura de água para irrigação no Oeste da Bahia levou à redução da disponibilidade hídrica de algumas regiões, fazendo com que alguns rios atinjam limites legais de exploração (Pousa *et al.*, 2019; Marques *et al.*, 2020). Apesar do aumento do uso deste recurso, as águas subterrâneas continuam a ser um recurso estratégico nesta região, responsável por até 95% da descarga nos rios locais durante a temporada seca (Gonçalves *et al.*, 2017a; Gonçalves *et al.*, 2019). O processo de infiltração afeta o escoamento superficial, a erosão do solo e recarga de águas subterrâneas. Entender como mudanças no uso da terra e nas práticas de gestão da produção agrícola afetam as taxas de infiltração, bem como melhores estimativas das taxas de recarga, é fundamental para o desenvolvimento sustentável dos recursos agrícolas e hídricos. Os principais objetivos do estudo de Eger *et al.*, (op. cit.) foram avaliar possíveis alterações na capacidade de infiltração causada por mudanças no uso e cobertura do solo e estimar as taxas de recarga na região do SAU-BA. Esses objetivos foram realizados, no Passo 1, utilizando um infiltrômetro de anel duplo para estimar a infiltração superficial em diferentes usos do solo e cobertura vegetal; no Passo 2, foi calculada a recarga utilizando a flutuação do lençol freático (WTF), e no Passo 3 foi calculada a recarga com base no SWAT - *Soil Water Assessment Tool*, (Neitsch *et al.*, 2011) para duas bacias hidrográficas menores; e, por fim, compararam-se e discutiram-se esses resultados para determinar a recarga da forma mais precisa possível para uso na modelagem hidrogeológica, apresentada no estudo de Leão *et al.* (2023) a seguir.

Os resultados do estudo de Eger *et al.* (2021) quanto aos testes de infiltração *in situ* mostram que o uso da terra afeta as taxas de infiltração, sendo estas consideravelmente menores em áreas antropizadas (devido ao trânsito de máquinas, pisoteio de animais domésticos e áreas desmatadas). No entanto, estes valores, mesmo com as taxas de infiltração diminuídas, são, em geral, superiores aos volumes de eventos mais intensos de chuva, mostrando que a capacidade de infiltração não foi comprometida na área, indicando que não há influência significativa do uso do solo na recarga das áreas do SAU-BA estudadas.

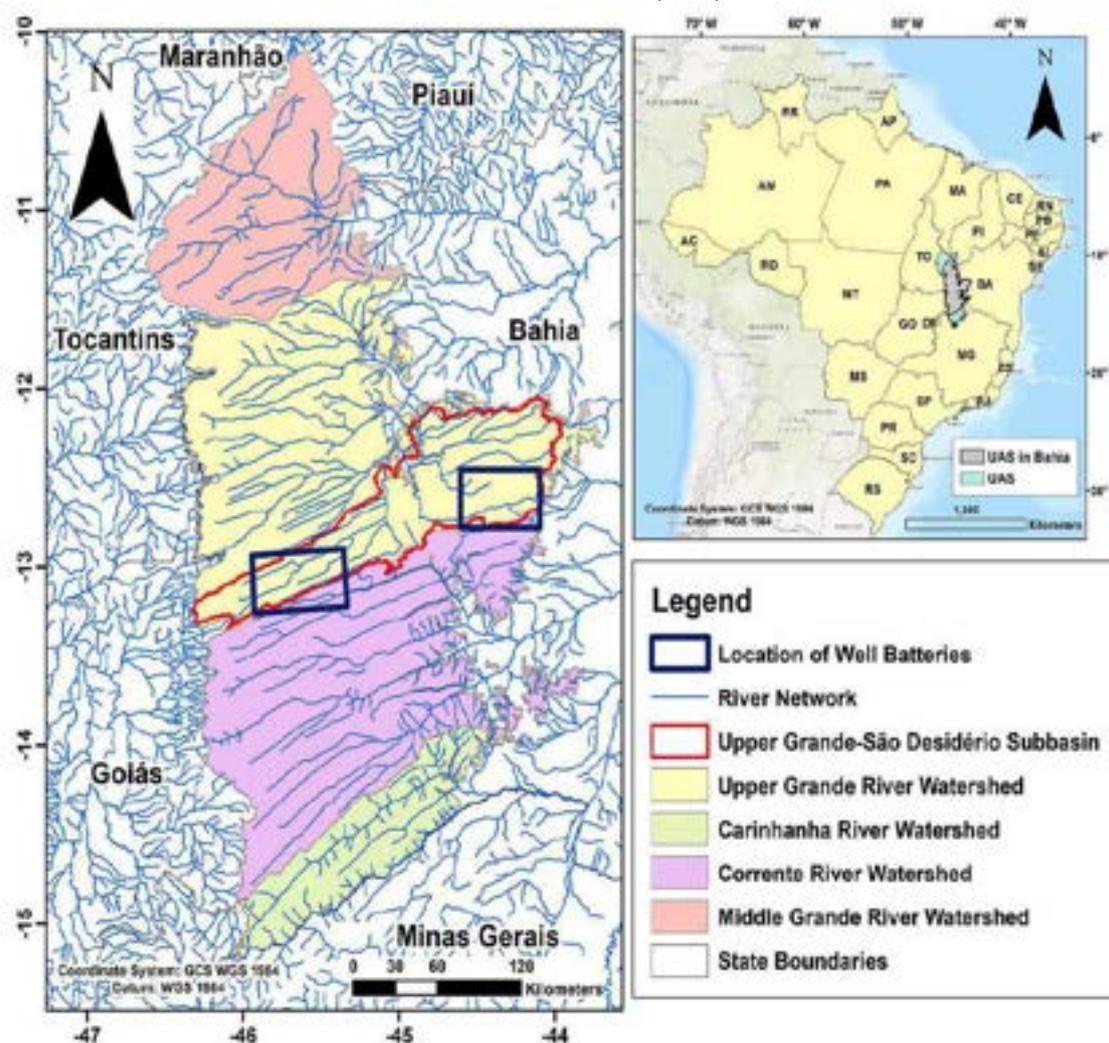
O método WTF indica um valor médio de recarga de 24% de precipitação para a bacia hidrográfica do Rio Grande e de 25% para a bacia do Rio Corrente. Esses valores estão próximos dos alcançados por outros estudos na região. As simulações com o código SWAT proporcionaram um bom resultado, com as taxas medidas pelo sistema de fluviômetros indicando as tendências do deflúvio das bacias. No entanto, as simulações subestimaram o fluxo de água subterrânea, especialmente durante o período de altas vazões. Os valores de recarga calculados correspondem a 19% da média anual volume precipitado para o período de 2011 a 2019 na bacia hidrográfica do rio Grande. Na Bacia do Rio Corrente-Arrojado este valor foi equivalente a 29% da precipitação média anual, no mesmo período. Com base nesses resultados, os valores de recarga estimados pela modelagem com o SWAT foram muito semelhantes aos estimados usando o método WTF, e estão em consonância com dados de outros trabalhos da literatura.

Os dados obtidos na pesquisa de Eger *et al.* (op. cit.) foram utilizados pelos autores no trabalho de Leão *et al.* (2023). A mudança no uso da terra levou a uma remoção parcial da cobertura vegetal nativa, composta principalmente pelo bioma Cerrado,

dando lugar a áreas destinadas à agricultura, conforme comentado. Essa expansão, somada às características climáticas bem definidas do oeste da Bahia, com períodos alternados de seca e chuva, trouxe grande demanda, principalmente relacionada à irrigação, pressionando os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, gerando um aumento nos pedidos de outorga (permissões para uso por tempo limitado) desses recursos inestimáveis. Muitos rios no oeste da Bahia já atingiram o máximo aproveitamento legal (Marques *et al.*, 2020), levando, nas últimas décadas, à explosão das solicitações de outorga de água na região para a extração de águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU-BA).

A sub-bacia Alto Grande - São Desidério, que faz parte da bacia do rio Grande, está localizada no Oeste - Porção do sul do Sistema Aquífero Urucuia na Bahia (Figura 13). Duas áreas, marcadas com retângulos azuis na Figura 13, foram selecionadas para o estudo, um na porção central e outro na porção leste do da sub-bacia.

Figura 13 - Áreas do SAU-BA selecionadas para as simulações de detalhe com os códigos numéricos do estudo de Leão *et al.* (2023)



Fonte: Leão *et al.* (2023).

Para a concessão de outorgas, a vazão média mínima do rio ($Q_{7,10}$) e a vazão de permanência ($Q_{90\%}$ ou $Q_{95\%}$), são amplamente utilizadas nos estados brasileiros como

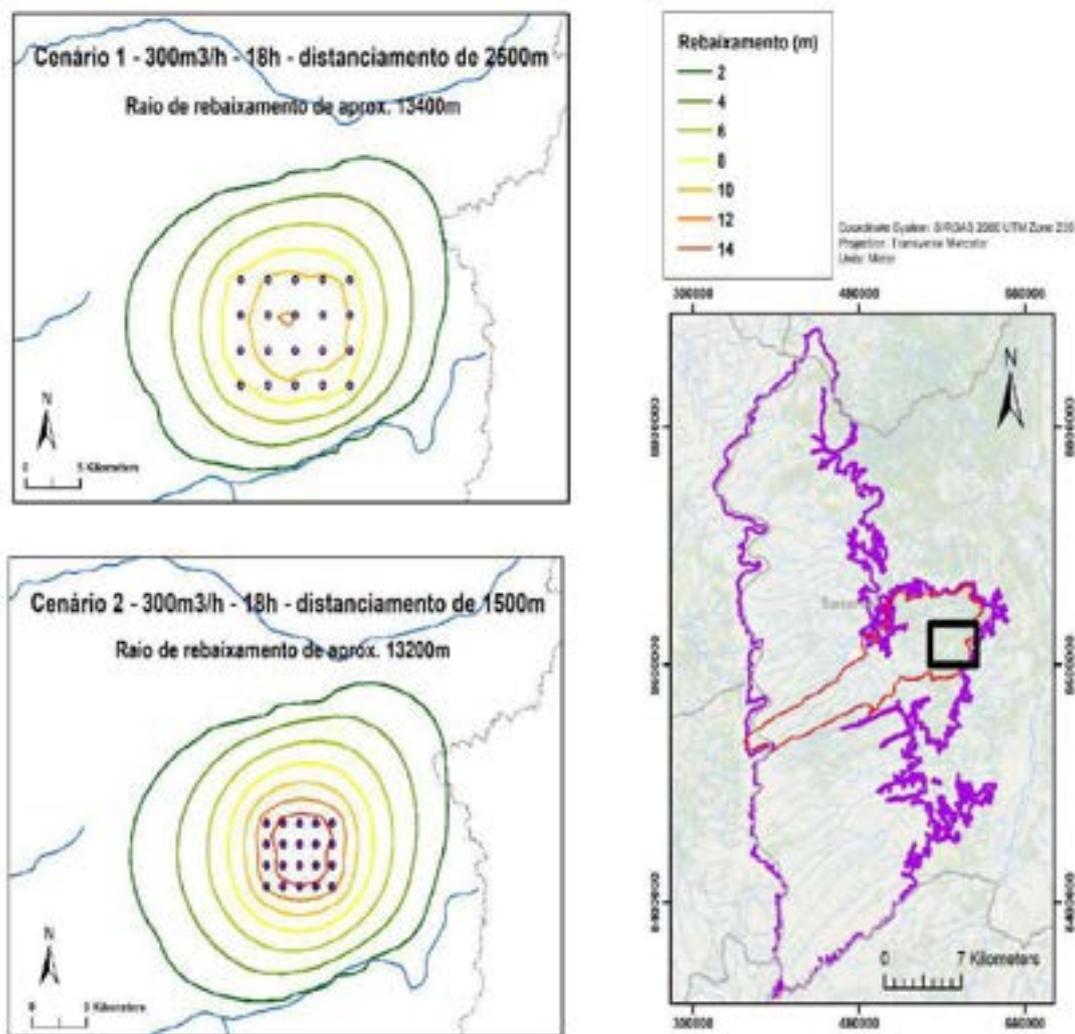
critério de referência para águas superficiais. Assim, grandes volumes de águas subterrâneas são extraídos através da concessão de águas superficiais (Rodrigues, 2013). Os órgãos estaduais em geral não possuem metodologias de análise levando em conta a conectividade de águas subterrâneas e águas superficiais. Assim, na maioria dos estados brasileiros há ferramentas, como métodos analíticos ou modelos numéricos, para apoiar o processo de decisão de outorga, mas estas baseiam-se em um relatório técnico elaborado apenas através da análise de documentos e levando em consideração aspectos da legislação local (Ramos, 2020). Por outro lado, normas para estabelecer distância mínima entre poços e entre poços e corpos de água superficiais estão ausentes em quase todos estados brasileiros.

O estado da Bahia criou norma para uma gestão integrada da água no SAU-BA, com a Instrução Normativa N° 15 do Instituto de Gestão de Águas e Clima (INGÁ), em 2010. Posteriormente, em 2022, houve uma atualização da norma, com a criação da Instrução Normativa N° 3 do INEMA. A IN 3 leva em consideração a taxa de bombeamento, distância entre poços e distância do poço a um corpo de água superficial, variando de uma distância inferior a 500 m (apenas para pequenos aproveitamentos para consumo humano e dessedentação de animais) até distâncias superiores a 2500 m, para extração de água com vazão de até 9000 m³/dia. O período máximo de bombeamento é de 18 h/d, e a taxa de bombeamento não deve exceder 500 m³/h. Há alguma flexibilidade na distância entre poços, dependendo do projeto apresentado, com suporte adicional de modelagem e monitoramento. Neste contexto, os modelos numéricos de águas subterrâneas são excelentes ferramentas para uma análise integrada, para avaliar os impactos da extração de águas subterrâneas no longo prazo.

Leão *et al.* (2023) utilizaram modelos para analisar impactos no Sub-bacia do Alto Grande-São Desidério, seguindo os critérios IN 3, ao projetar cenários alternativos. O código MODFLOW (McDonald; Harbaugh, 2003) foi empregado como ferramenta de gestão para criar modelos de avaliação dos impactos de baterias hipotéticas, porém plausíveis, de poços de água sobre os recursos hídricos subterrâneos em duas áreas do da bacia do Alto Grande-São Desidério (Figura 13). O modelo foi calibrado usando o cenário atual de bombeamento, e o balanço hídrico foi avaliado usando a ferramenta ZONEBUDGET, código acessório acoplado ao MODFLOW. Os resultados indicaram que no ano de 2023 a extração de águas subterrâneas representa apenas 2,5% da recarga, e a maior parte da água que sai do aquífero abastece a descarga do rio. Após a calibração, foram simulados cenários para avaliar os impactos do bombeamento de poços no rebaixamento. A combinação de uma vazão de bombeamento mais alta com uma distância menor entre os poços causou um maior rebaixamento local devido a possíveis interferências entre os poços ao longo do tempo.

Cenários com vazões de bombeamento diárias maiores apresentaram maiores rebaixamentos, demonstrando a influência negativa deste fator. O estudo de Leão *et al.* (2023) mostrou que os impactos de baterias de poços nos recursos hídricos subterrâneos podem ser significativos, especialmente em algumas áreas restritas (Figura 14). Nessas áreas, o balanço hídrico realizado resultou em até 84,6% da recarga local sendo captada por meio de bombeamento, o que está bem acima do que é considerado sustentável para a área de estudo. Portanto, deve-se evitar bombeamento adicional nessas áreas.

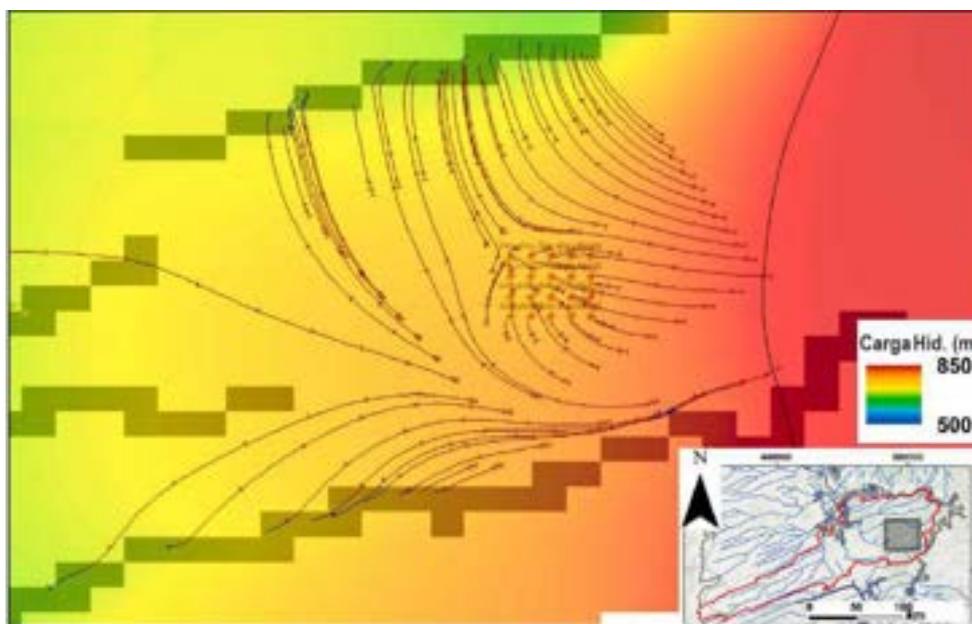
Figura 14 - Cenários de efeitos de bombeamento do SAU-BA durante dez anos usando o MODFLOW, com variação das distâncias entre poços, tendo em conta a IN-15 (INEMA-BA) na bacia do Rio Grande na Região de São Desidério, Bahia, Brasil



Fonte: Os Autores (2024).

A ferramenta MODPATH permitiu a análise e visualização da área de influência de captação do poço, gerando desvios na trajetória do fluxo de águas subterrâneas, principalmente na área oriental (Figura 15). Os resultados para a área leste demonstraram um rebaixamento maior no centro das baterias e um maior raio de influência do rebaixamento em relação à área central. Esse fato é explicado pela menor disponibilidade de água na região leste, expressa pelo maior rebaixamento do lençol freático e menor transmissividade das camadas filtradas, nas quais os poços do leste da região estão localizados. Além disso, existem diferenças na condutividade hidráulica entre as camadas do modelo nas diferentes regiões, gerando áreas de rebaixamento maiores conforme esse parâmetro. Os resultados aqui apresentados podem contribuir para o desenvolvimento de planos de gestão sustentável das águas subterrâneas para a sub-bacia do Alto Grande-São Desidério e também podem ser estendidos e replicados em outras regiões com características semelhantes.

Figura 15 - Linhas de fluxo local para o cenário de simulação 1, na porção leste da área de estudo obtidas com a ferramenta MODPATH. Observa-se uma grande influência dos poços de bombeamento nas trajetórias, com capturas de linhas de fluxo. No canto inferior direito está a localização da região central do modelo geral, representada em vermelho



Fonte: Leão *et al.* (2023).

Segundo Leão *et al.* (2023), demonstrou-se que é possível utilizar um modelo numérico de águas subterrâneas como ferramenta de apoio à análise de exigências para perfuração de poços e aproveitamento de água subterrânea no oeste da Bahia. A simulação de cargas hidráulicas em combinação com a avaliação de rebaixamento, balanço hídrico e trajetória de vazão no período simulado tem um alto potencial para auxiliar a gestão. Serve também como complemento juntamente com a análise da documentação atualmente exigida, ajudando a apoiar a tomada de decisão dos técnicos da agência responsável pela análise dos processos. É possível, após a devida calibração e validação, executar vários cenários alternativos, como exemplificado no estudo de Leão *et al.* (2023). Isso permite tanto os produtores como técnicos da agência verificar o efeito do bombeamento que é objeto de pedido de outorga antes de sua implantação efetiva.

12.4 Considerações finais

Os dados apresentados neste capítulo permitem identificar as principais unidades geológicas e hidrogeológicas que compõem a região em que ocorre o Cerrado brasileiro. Entretanto, observa-se que há a necessidade de avanços no conhecimento hidrogeológico destas regiões, já que a base de dados existente encontra-se em escala regional, que não permitem definir, de forma adequada, a extensão dos aquíferos, identificar zonas de recarga e descarga, espessuras dos aquíferos principais e nem permitem uma caracterização adequada de suas propriedades hidrodinâmicas, aspectos fundamentais para embasar uma gestão adequada destes recursos hídricos fundamentais para a manutenção da cobertura vegetal de Cerrado. Há, ainda, a necessidade de instalação de uma rede de monitoramento e estações fluviométricas que forneçam dados para modelagens e ferramentas de gestão.

Referências

- AB'SABER, A. N. 1982. O domínio dos cerrados: introdução ao conhecimento. **Revista Servidor Público**, Brasília, v. 3, n. 4, p. 41-55, 1983. [Republicado em AB'SÁBER, A. N. Domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.]
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In*: PINTO C. P.; MARTINS-NETO, M.A. (Eds.). **A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais**. SBG, Belo Horizonte, p.: 9-30. 2001.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada**. Vol. 1 Brasília: ANA, 2017.
- ANDRADE, B. C. C.; ANDRADE PINTO, E. J.; RUHOFF, A. *et al.* Remote sensing-based actual evapotranspiration assessment in a data-scarce area of Brazil: a case study of the Urucuia Aquifer System. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.** 98, 102298. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102298>.
- BARBOSA, J. S. F.; CORREA-GOMES L. C.; MARINHO M. M.; SILVA F. C. A. Geologia do segmento sul do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá. **Rev. Bras. Geoc.**, 33(1):33-48, 2003.
- BARBOSA, N. S. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia. **Tese (Doutorado)**. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 168p. 2016.
- BARBOSA, N.S.; LEAL, L.R.B.; SANTOS, R.L.S.; MELLO, J.C. Caracterização Hidro-Litoestratigráfica do Sistema Aquífero Urucuia com base em Perfis Geofísicos de Poços. *In*: Suplemento - **XVIII Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas**, Belo Horizonte. Resumos expandidos. p.18. 2014.
- BARROS, J. S.; CASTRO, A. A. J. F. Compartimentação geoambiental no Complexo de Campo Maior, PI: uma área de tensão ecológica. **Interações. Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, Campo Grande-MS, v. 8, n. 13, p. 119-130. 2006.
- BARROS, J. S; HARIDASAN, M.; FARIAS, R. R. S. *et al.* Influence of geology and soil fertility in vegetation types and vegetation structure in edaphoclimatic transition area Parnaíba - Piauí basin, northeast Brazil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, Ano 1, Nº 01, 2020. p.06-19. Disponível em: DOI:10.29327/261865.1.1-1.
- BLANC, P. C.; NEWELL, C. J. 2012. **Groundwater hydrology and contaminant transport**. Class notes.
- BONFIM L. F. C.; GOMES, R. A. A. D. Aquífero Urucuia – geometria e espessura: ideias para Discussão. *In*: **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, vol. XX. Cuiabá (MT), Anais. 1 CD-ROM. 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterra>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- CALDAS, J. Águas do Cerrado são questão estratégica para o país. **Jornal Dia de Campo**. 2013. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Newsletter.asp?data=14/09/2013&id=28947&secao=Agrotemas>. Acesso: 06 nov. 2017.
- CAMPOS, J. E. G. Estratigrafia, Sedimentação, Evolução Tectônica e Geologia do Diamante da porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana. 1996. 204p. **Tese de**

Doutoramento do Instituto de Geociências - Universidade de Brasília. Brasília (DF), 1996.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Rev. Bras. Geociências** 27 (3), 283 –294, 1997.

CAMPOS, J.C.V.; BRIZ, E.M.; LUZ, J.A.G. Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia – Fazenda Bombarda. *In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, São Luís (MA), Anais, p.1-17. 2010,

CARVALHO, L. G. Compartimentação Estratigráfica e Estrutural do Sistema Aquífero Urucuia como Subsídio a Gestão dos Recursos Hídricos na Região Oeste do Estado da Bahia. 2022. 181p. **Tese (Doutorado em Geologia)** - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022.

CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Diagnóstico consolidado da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Relatório Parcial 1. 489p. 2015. Disponível em: https://2017.cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2016/08/PRH-SF_Apresentacao_26ago16.pdf/. Acesso em: 15 mai. 2022.

CHANG, H. K.; SILVA, F. P. E. **Contribuição ao arcabouço geológico do Sistema Aquífero Urucuia**. *Geociências* 34 (4), 872 –882, 2015.

COELHO, C. D.; FARIA, A. C. S.; MARQUES, E. A. G. Comparative analysis of different boundary conditions and their influence on numerical hydrogeological modeling of Palmital watershed, southeast Brazil. **J. Hydrol.: Reg. Stud.** 12, 210 – 219. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.006>.

COSTA, M. R.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. D. *et al.* **Water Footprint of soybean, cotton, and corn crops in the western region of Bahia State**. *Eng. Sanitária Ambiental*. 26, 971 –978.

DELGADO, I. M. *et al.* 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. *In: BIZZI, L. A. et al.* (Ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: textos, mapas & SIG**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. p. 227-334.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C. *et al.* Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesqui. Agropecu. Bras.** 51, 1003–1020. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>.

EGER, G. Z. S.; SILVA JUNIOR, G. C.; MARQUES, E. A. G. *et al.* Recharge assessment in the context of expanding agricultural activity: Urucuia aquifer system, western state of Bahia, Brazil. **J. S. Am. Earth Sci.** 112 (Part 1), 103601. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103601>. ISSN 0895-9811.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cerrado: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável** / editores técnicos Lucília Maria Parron... [et al.] – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 464 p., 2008.

ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Simulação Numérica do Fluxo de Águas do Sistema Aquífero Urucuia na Bacia Hidrogeológica do Rio Corrente (BA). **Águas Subterrâneas**, 29(2), 244–256. 2015. <https://doi.org/10.14295/RAS.V29I2.28435>.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO. (Orgs.). **Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações**. CPRM Serv. Geol. Brasil. 567 p. 1997.

-
- GASPAR, M. T. P., 2006. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. 2006. 158 f. **Tese (Doutorado)**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O sistema aquífero Urucuia. **Rev. Bras. Geociências** 37 (4), 216–226. 2007.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; MORAES, R. A. V. Determinação das espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de estudo geofísico. **Revista Brasileira de Geociências**, 42(Suppl 1):154-166. 2012.
- GONÇALVES, R. D.; CHANG, H. K. Modelo hidrogeológico do sistema aquífero Urucuia na bacia do rio Grande (BA). **Geosciences= Geociências** 36 (2), 205–220. 2017a.
- GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z., CHANG, H. K. **Evolução da Contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil**. *Águas Subterrâneas* 32 (1), 1–10. 2017b. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28916>.
- GONÇALVES, R. D.; STOLLBERG, R.; WEISS, H.; CHANG, H. K. **Using GRACE to Quantify the Depletion of Terrestrial Water Storage in Northeastern Brazil: the Urucuia Aquifer System**. *Science of The Total Environment*, 135845. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.1358>.
- HARBAUGH, A.W. **A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground water flow model**: U.S. Geological Survey Open-File Report 90–392, 46. 1990. <https://doi.org/10.3133/ofr90392>.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Normais Climatológicas (1960/2015)**. Brasília - DF, 2023.
- LEÃO, B. R. C.; SILVA JUNIOR, G. C.; EGER, G. Z. S. *et al.* **Numerical modeling as a support tool for groundwater permits in the state of Bahia, Brazil**. *Groundwater for Sustainable Development* 23 (2023) 100986. 2023.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. 2005. Estimativa da produção hídrica superficial do Cerrado brasileiro. *In*: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (Orgs.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.
- MANTOVANI, E.C. *et al.* **Estudo do potencial hídrico da região oeste da Bahia: quantificação e monitoramento da disponibilidade dos recursos do aquífero Urucuia e superficiais nas bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhonha**. 2019. Relatório técnico final. Viçosa: AIBA. Disponível em: <https://aiba.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Relatorio-final-Estudo-dos-Recursos-Hidricos-naRegiao-Oeste-da-Bahia-v2.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- MARQUES, E. A. G.; SILVA JUNIOR, G. C.; EGER, G. Z. S. *et al.* Analysis of Groundwater and River Stage Fluctuations and Their Relationship with Water Use and Climate Variation Effects on Alto Grande Watershed. Northeastern Brazil. 2020. **Journal of South American Earth Sciences**. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102723>.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **The history of MODFLOW**. *Ground Water* 41 (2), 280–283. 2003. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02591.x>.

MILANI E. J.; THOMAZ FILHO A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: U.G. CORDANI, E.J. MILANI, A. THOMAZ FILHO, D.A. CAMPOS (Eds.) 2000. Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, 31st Int. Geol. Congr. p. 389-452.

MILANI E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: V. MANTESSO NETO, A. BARTORELLI, C. D. R. CARNEIRO, B. B. DE BRITO-NEVES (Orgs.). 2004. **Geologia do Continente Sul-Americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Ed. Beca. p. 265-279.

NASCIMENTO, K. R. F.; LIMA, O. A. L. Cálculo de parâmetros hidráulicos do Aquífero Urucuia utilizando dados geoeletricos. In: 13th **International Congress Of The Brazilian Geophysical Society**. 2013. Rio de Janeiro, Brasil, p.6. 2013.

NASCIMENTO, K. R. F. (Coord.). **Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas-Bahia. Relatório Final. Salvador-BA: 2003**. ANA/ GEF/PNUMA/OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). 208p. 2003.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. Texas Water Resources Institute. 2011.

OLIVEIRA, L. T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L. R. B.; GRISSOLIA, E. M., Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia-Brazil. **Revista Ambiente & Água** 14. 2019. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2390>.

PEREIRA, B. H. F.; DERECZYNSKI, C.; SILVA JUNIOR, G. C. *et al.* Projected climate change impacts on groundwater recharge in the Urucuia aquifer system, Brazil. **Int. J. Climatol.** 42 (16), 8822–8838. 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7773>.

PIMENTEL, A. L.; AQUINO, R. F.; SILVA, R. C. A. *et al.* Estimativa da recarga do aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: **Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português**, 1 (Rio de Janeiro. Anais). 2000.

POLLOCK, D. W. User 's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT. Version 3: A Particle Tracking Post-Processing Package for MODFLOW, the US Geological Survey Finite-Difference Ground-Water Flow Model. **Geol. Surv. Open File Rep.** 94–464, 234 –p. 1994.

POLLOCK, D. W. **User guide for MODPATH** version 6—a particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, 58 chap. A41. 2012.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M. *et al.* Climate change and intense irrigation growth in western Bahia, Brazil: the urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water** 11 (5), 933. 2019. <https://doi.org/10.3390/w11050933>.

PRANDI, E. Gestão integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas Bacias Hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe/SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, **Tese (Doutorado)**, 142 p. e anexos. 2010.

RAMOS, C.A. Avaliação dos Critérios Vigentes de Outorga de Recursos Hídricos Subterrâneos: Caso do Sistema Aquífero Urucuia, Oeste da Bahia. 2020. 60 f.

Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2020.

ROCHA, A. B. A.; BARBOSA, V. R. F.; FARIA, K. M. S. *et al.* Geomorphologic Map of the Brazilian Cerrado by geomorphometric archetypes. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.23, n.3; (Jul-Set). 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i3.2132

RODRIGUES, Z. R. C. Aplicação de Métodos Analíticos para Outorga e Gestão Integrada dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande. 2013. 98 f. **Dissertação. Mestrado em Geologia**) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2013.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; FARIAS, D. B. S. *et al.* **Agricultura irrigada no cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, DF: Embrapa, 2023, 200 p.

SCHUSTER, H. D. M.; SILVA, F. F.; TEXEIRA, S. L. *et al.* Estudos Hidrogeológicos do Aquífero Urucuia no Oeste baiano para Obtenção de Parâmetros nas outorgas de mananciais Subterrâneos. *In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 12. Santa Catarina, CD-ROM. 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22736/>. Acesso em: 15 mai. 2022.

SILVA C. E. M. **O cerrado em disputa: apropriação global e resistências locais.** Brasília: Confea, 2009.

SILVA, M. G. **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras.** Organizadores: Maria da Glória da Silva, Manoel Barretto da Rocha Neto, Hardy Jost [e] Raul Minas Kuyumjian... – Belo Horizonte: CPRM, 589 p.: il. 2014.

SOUZA, C. L. F.; OLIVEIRA, R. B.; MUSTAFÉ, D. N. *et al.* **O cerrado como o “berço das águas”: potencialidades para a educação geográfica.** Revista Cerrados. Montes Claros – MG, v. 17, n. 1, p. 86-113, jan./jun.-2019. <https://doi.org/10.22238/rc244826922019170186113>.

TEXEIRA, W. *et al.* **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 558p. 2007.

TSCHIEDEL, M.W. Aplicação de Estudo Geofísico como Contribuição ao Conhecimento da Tectônica da Sub-Bacia Urucuia. 2004. **Dissertação (Mestrado)** - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

VIEIRA, M. de S. B. Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica. 2021. 217 f. **Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica)** – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CAPÍTULO 13

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA SEGURANÇA HÍDRICA DE ÁREAS IRRIGADAS NO CERRADO

Lineu Neiva Rodrigues

Saulo Aires de Souza

Edson Eyji Sano

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Resumo

Cenários indicam que, em 2050, a população mundial poderá chegar a 9,1 bilhões de pessoas, 34% a mais que a atual. Esse aumento populacional ocorrerá quase todo nos países em desenvolvimento. A urbanização também continuará em ritmo acelerado; cerca de 70% da população mundial deverá ser urbana. Produzir alimento, considerando todas as incertezas, exigirá gestores cada vez mais atentos aos processos: legais/institucionais, hídricos e energéticos. No Brasil, a ponte rural-urbano fundamentada nonexo água-alimento precisará ser robusta e sólida, de forma que a economia circular venha a ser praticada integralmente, com foco no ajuste do cenário de negócios, como de costume, para novos cenários baseados em inovações tecnológicas e também alternativos para que, de fato, viabilizem os direitos para o uso da água e o acesso pleno aos alimentos, tanto para consumo interno como para a exportação, conectados e baseados nos novos conceitos da bioeconomia e fundamentados em uma Política Pública de Estado. Água é o principal insumo para produção de alimentos. A água da chuva, muitas vezes não é suficiente ou não vem nos prazos esperados pelas culturas, comprometendo a produção agrícola. Quando isso acontece, a irrigação pode ser utilizada para auxiliar a natureza, reduzindo o déficit hídrico e dando estabilidade à produção. A sustentabilidade nas atividades da agricultura irrigada e, conseqüentemente, na produção de alimentos, depende de segurança hídrica, que, por sua vez, depende de uma gestão efetiva dos recursos hídricos para ser alcançada. Neste contexto, a oferta e a demanda hídrica devem ser avaliadas de forma conjunta, considerando suas variabilidades espaciais e temporais. Nesse processo, é fundamental considerar as desigualdades hídricas regionais e ter um olhar diferenciado para as bacias hidrográficas, principalmente naquelas onde a disponibilidade hídrica já está comprometida, utilizando, para isto, abordagens atualizadas e ferramentas de apoio à decisão.

13.1 Introdução

O Cerrado ocupa aproximadamente 24% do território brasileiro e produz cerca de 70% da produção nacional de grãos e carne bovina (Klink, 2014). Essa região do território brasileiro tem potencial para contribuir efetivamente para suprir parte do aumento da demanda de alimentos projetada para o mundo.

Tem-se observado na região, entretanto, um crescimento contínuo da agricultura irrigada nessa região, que já representa cerca de 64% da irrigação praticada no Brasil (BRASIL, 2014). Estudo realizado por Althoff e Rodrigues (2019) indicou que 80% dos

pivôs centrais do país estão localizados no Cerrado e que, com a projeção de crescimento médio de 56.000 ha ano⁻¹, a área irrigada pode atingir até 3 Mha em 2050, o que pode alterar a dinâmica de uso de água na região.

Esse cenário de crescimento da agricultura irrigada, aliado às estimativas de projeções climáticas no Cerrado, onde são esperados aumentos na temperatura, prolongamento da estação seca e redução na disponibilidade hídrica, pode comprometer a agricultura da região, especialmente a agricultura de sequeiro (Chou *et al.*, 2014; Pires *et al.*, 2016). Dessa forma, será cada vez mais preponderante adotar estratégias de planejamento e manejo que considere os recursos hídricos de forma integrada, e que favoreça a alocação equitativa de recursos hídricos, sempre observando os usos múltiplos da água e a bacia hidrográfica como unidade de referência (Rodrigues; Cruvinel, 2019).

Em um contexto, em que a segurança hídrica é a base do desenvolvimento regional, a gestão de recursos hídricos superficiais e subterrâneos deve ser realizada de forma integrada. No ambiente rural, não se pode pensar em agricultura e desenvolvimento sustentável sem que haja um equilíbrio entre oferta e demanda de água. Para tanto, cuidados devem ser tomados para que seu uso seja racional, o que implica em vencer desafios para o estabelecimento adequado de técnicas de manejo que envolvem seus múltiplos usos e também esforços para minimização de riscos.

O Brasil é um país de dimensões continentais e apresenta grandes diferenças sociais, ambientais e econômicas, o que faz da gestão de recursos hídricos uma atividade ainda mais desafiadora. A utilização das mesmas premissas para a gestão de recursos hídricos em todo o País é um grande equívoco, pois podem levar a conflitos em bacias hidrográficas que já se encontram em estado crítico em termos de disponibilidade hídrica. A gestão deve ser adaptada às realidades regionais, de forma a considerar suas características, incluindo um olhar diferenciado para as bacias hidrográficas críticas, onde a disponibilidade hídrica já se encontra comprometida, assim como onde a ocorrência de conflitos pelo uso da água já é realidade.

A irrigação agrega benefícios importantes para agricultura do Cerrado, propiciando a sua verticalização, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. A agricultura irrigada, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, principalmente no período seco (abril a setembro). Assim, se não for bem planejado, o crescimento da irrigação no Cerrado pode implicar em aumento nas disputas pelo uso de água nas bacias hidrográficas, principalmente bacias que já se encontram com baixa disponibilidade hídrica.

Desta forma, é importante desenvolver estratégias para reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais pelos diversos usos, o que pode ser viabilizado por meio de um planejamento integrado de bacia hidrográfica, que estabeleça estratégias efetivas para aumentar a eficiência dos diversos usos, principalmente da irrigação, que é a principal usuária de água.

A segurança hídrica no Cerrado passa por adoção de estratégias técnicas que contribuam para o aumento da eficiência no uso da água (redução da demanda) e da oferta hídrica. Na oferta, é fundamental pensar na conservação de solo e água e no monitoramento, ou seja, a segurança hídrica de uma região depende de uma gestão estratégica e efetiva da demanda e da oferta hídrica.

Dado ao aumento das incertezas em relação ao clima, o desenvolvimento sustentado da agricultura no Cerrado vai depender cada vez mais do crescimento

sustentável da irrigação nessa região. Esse crescimento necessita vir respaldado por um planejamento estratégico de médio e de longo prazo, em que a irrigação seja incluída nas políticas de estado de segurança hídrica e energética (Rodrigues; Domingues, 2017).

13.2 Contextualização

13.2.1 Gestão de recursos hídricos

No Brasil, a gestão de recursos hídricos desenvolveu-se com maior intensidade e vigor nas Unidades da Federação e nas bacias hidrográficas, onde eram e ainda são percebidos conflitos relacionados às restrições ao acesso à água. Esses conflitos decorrem tanto de questões relacionadas à baixa disponibilidade hídrica, quanto de questões relacionadas ao excesso da demanda. Até o final do século passado, os principais problemas relacionados ao acesso à água eram verificados, com maior intensidade, apenas no semiárido nordestino, no entorno das grandes cidades brasileiras e, pontualmente, em áreas específicas de estados do Sul e do Sudeste (ANA, 2014).

Atualmente, em razão da falta de planejamento intersetorial de longo prazo e do desenvolvimento acelerado e, muitas vezes, sem planejamento das diversas atividades econômicas, são encontradas áreas no País que também começam a apresentar os primeiros conflitos intrasetoriais e intersetoriais em torno da demanda e da oferta de recursos naturais, dentre eles a água (ANA, 2014). Esse é o caso, por exemplo, de várias bacias hidrográficas do bioma Cerrado.

A Constituição Federal dividiu o domínio das águas entre a União, os Estados e o Distrito Federal (DF). Cabe aos estados e ao DF o domínio das águas subterrâneas e dos rios estaduais e dos distritais. Por sua vez, a Lei das Águas determina que a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos é a bacia hidrográfica, que, em geral, não coincide com a divisão político-administrativa das unidades federadas e nem com os limites dos aquíferos (ANA, 2013).

Após a Constituição Federal de 1988, que definiu como competência da União a instituição do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) (Art.21, XIX) e determinou que as águas são bens públicos de domínio da União ou dos estados (Arts. 20 e 26, respectivamente), ocorreu a edição da Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o PNRH (MMA, 2006).

A PNRH baseia-se nos seguintes fundamentos: (a) a água é um bem de domínio público; (b) a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; (c) em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; (d) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; (e) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e para a atuação do SINGREH; (f) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades.

Constituem-se em diretrizes gerais de ação para implementação da PNRH: (a) a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade; (b) a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País; (c) a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental; (d) a articulação do planejamento de recursos hídricos com os setores usuários e com os planejamentos

regional, estadual e nacional; (e) a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo; e (f) a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.

São instrumentos da PNRH: (a) os planos de recursos hídricos; (b) o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; (c) a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; (d) a cobrança pelo uso de recursos hídricos; (e) a compensação a municípios; e (f) o sistema de informações sobre recursos hídricos.

Pode-se inferir o quão avançado está uma bacia em relação a outra a partir da implementação e do nível de funcionamento dos instrumentos de gestão em seu território, e da estrutura e dinâmica de participação dos entes e atores do SINGREH, que promovem e atuam para desenvolver a gestão na bacia hidrográfica. A implementação de alguns instrumentos depende da existência prévia de outros, fornecendo base técnica para a consolidação, estruturação e funcionamento. Como exemplo, os planos de recursos hídricos dependem da existência de comitês para sua elaboração, aprovação e acompanhamento posterior durante a fase de implementação. Esses planos, por sua vez, são documentos estratégicos que fornecem diretrizes para a implementação de outros instrumentos e demais ações, conferindo maior eficácia à gestão.

Com o avanço das sociedades modernas, tem havido um aumento nas necessidades por recursos hídricos, tornando os sistemas hídricos cada vez mais complexos. Para lidar com essas complexidades, os procedimentos técnicos, analíticos e de governança para a gestão hídrica vem evoluindo para acompanhar as crescentes demandas da sociedade. Mais recentemente, constatou-se a necessidade por uma gestão ainda mais complexa tendo em vista as incertezas associadas às mudanças climáticas.

Em contextos complexos e altamente incertos, tais como esses envolvidos em muitas decisões relacionadas às mudanças climáticas e os recursos hídricos, as condições necessárias para a aplicação da análise de riscos e incertezas tradicionais se tornam praticamente inviáveis. Essa inviabilidade prática vem motivando o desenvolvimento de novas ferramentas e estudos por parte da comunidade de recursos hídricos (planejadores, gestores, acadêmicos etc.) voltados agora para um novo mundo de incertezas a serem enfrentadas no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Assim, é fundamental que a gestão de recursos hídricos no Brasil e principalmente no Cerrado incorpore os impactos da mudança climática a partir de cenários hidroclimatológicos. Para isso, deve-se incorporar uma visão onde se reconhece a incerteza advinda da impossibilidade estrutural de se prever de forma determinística o futuro e de controlá-lo, incerteza essa que pode ser traduzida em cenários que prevêm futuros potenciais.

Essa impossibilidade de se controlar a realidade demandará, tanto por parte tanto dos órgãos gestores de recursos hídricos como por parte dos seus usuários, estratégias de adaptação que proporcione ao sistema de recursos hídricos flexibilidade para operar de forma persistente e eficaz nos diferentes futuros potenciais alternativos constituindo-se em uma estratégia robusta. Nesse sentido, deve-se avançar e inovar nas ferramentas de gestão, incluindo seus instrumentos, e na própria política nacional de recursos hídricos para proporcionar uma maior segurança hídrica e, com isso, possibilitar a sociedade navegar por um mundo incerto em direção a soluções provavelmente imperfeitas, mas robustas e socialmente aceitáveis.

13.2.2 Ferramentas de apoio ao planejamento e à gestão de recursos hídricos

Além dos modelos matemáticos de apoio à tomada de decisão, as estratégias de segurança hídrica devem se apoiar em ferramentas que possibilitam, aos gestores, terem uma visão integrada do sistema. Essas ferramentas, de geotecnologias, devem possibilitar que os diversos fatores que interferem na segurança hídrica possam ser avaliados de forma conjunta, como, por exemplo ferramentas com uso de geotecnologias.

Nesse sentido, seguindo os princípios da sustentabilidade, torna-se importante que os gestores ambientais monitorem os parâmetros biofísicos em diferentes escalas espaciais e temporais. As análises dos indicadores ambientais e de suas anomalias com aplicação de geotecnologias ao longo dos anos nas bacias hidrográficas do Cerrado, são importantes para essa tarefa, contribuindo para uma redução dos impactos negativos aos agros-ecossistemas.

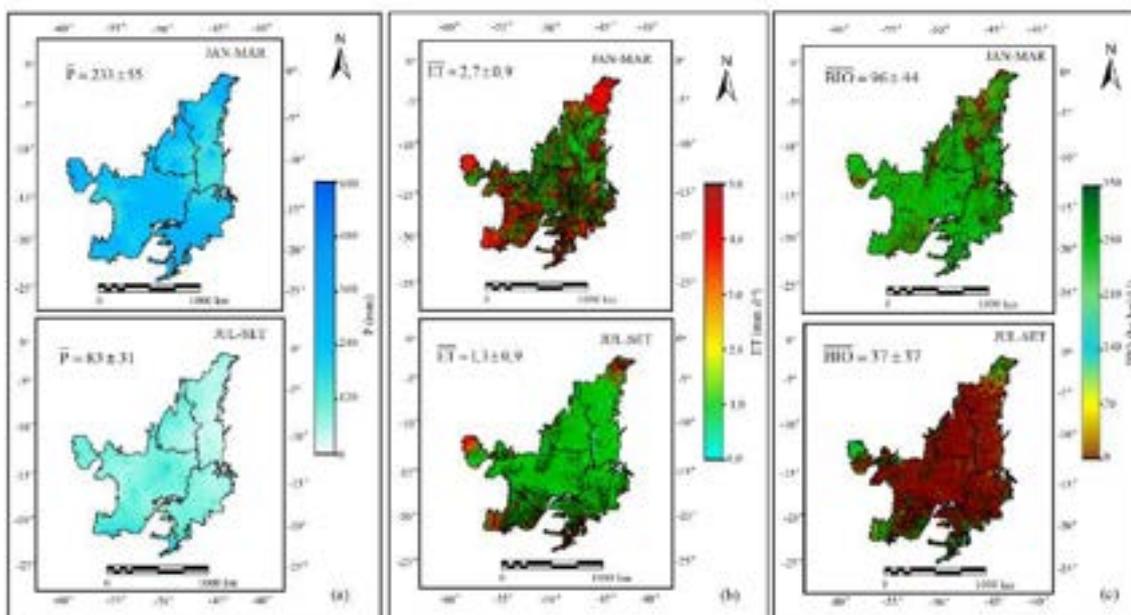
Dentre os indicadores ambientais, destaca-se a evapotranspiração (ET), pois representa o principal uso dos recursos hídricos pela vegetação bem suprida de água e, em adição, está relacionada com a produção de biomassa (BIO) (Teixeira *et al.*, 2020a, b). Por um lado, embora com esta relação, o aumento da ET implique em menor disponibilidade hídrica para usos ecológicos e humanos, por outro lado, a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas pode afetar a biomassa (Ceschia *et al.*, 2010). Devido às limitações de medições pontuais, a extrapolação desses indicadores por meio de geotecnologias é uma alternativa viável para suporte às políticas públicas relacionadas ao uso racional dos recursos naturais.

Indicadores ambientais derivados de ET e da biomassa podem ser integrados com dados interpolados ou estimados por meio de imagens de sensoriamento remoto de precipitação (P), possibilitando a obtenção do balanço hídrico ($BH = P - ET$) e da produtividade da água ($PA = BIO/ET$). A importância do uso de geotecnologias para estimar esses indicadores em diferentes escalas temporais e espaciais em estudos ambientais tem sido enfatizada em vários estudos (Beguería *et al.*, 2014; Bento *et al.* 2018; Casagrande *et al.*, 2021; Gouveia *et al.* 2017; Vicente-Serrano *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019).

Deve-se atentar a responsabilidade ambiental do desenvolvimento sustentável, com utilização desses indicadores para monitoramento dos impactos ambientais por meio de modelagens com geotecnologias no bioma Cerrado. Esses impactos, decorrentes de ações não sustentáveis, podem variar em intensidade, e, em alguns casos, não é possível a recuperação dos danos causados pelo uso intensivo dos recursos naturais.

O monitoramento envolvendo períodos específicos ao longo dos anos é útil tanto para ações prévias de controle ambiental como para aquelas restauradoras, considerando-se a legislação ambiental que tem, como base, os princípios da sustentabilidade. Identificando-se as áreas potencialmente impactadas, as tecnologias disponíveis podem ser viabilizadas com base na utilização de dados de estações climáticas automáticas em conjunto com sensoriamento remoto. Como exemplo de aplicação de geotecnologias para determinação desses indicadores no bioma Cerrado, a Figura 1 apresenta as distribuições espaciais dos valores médios de precipitação (P), evapotranspiração atual (ET) e da produção de biomassa (BIO) juntamente com os desvios padrões nos trimestres mais seco (janeiro a março) e mais úmido (julho a setembro) do ano de 2016 no Cerrado.

Figura 1 - Distribuições espaciais dos valores trimestrais com médias e desvios padrões de indicadores ambientais para o ano de 2016 no bioma Cerrado. (a) precipitação (P), (b) evapotranspiração atual (ET) e (c) produção de biomassa (BIO), para os períodos mais úmidos (janeiro a março) e mais seco (julho a setembro). As barras indicam médias para todo o bioma



Fonte: Os Autores (2024).

Identificar, de forma comparativa, a viabilidade, principalmente em relação ao uso de água, de produção em diferentes áreas dentro de grandes regiões como a do Cerrado, é estratégico nas políticas públicas que visem um desenvolvimento sustentável. Isso envolve o entendimento da complexa interação existente entre os fatores envolvidos, condições de clima, solo e planta, o que é dificultado pela falta de informações espaciais e temporais adequadas.

Nesse sentido, Ferreira e Rodrigues (2024) desenvolveram um índice para avaliar a viabilidade de produção em áreas dentro de regiões (IVP). O IVP foi desenvolvido para indicar regiões mais viáveis para produção de culturas agrícolas anuais, com foco na demanda e na oferta hídrica. O seu valor varia de zero a um, sendo que, quanto mais próximo da unidade, maior a viabilidade de se produzir uma determinada cultura agrícola naquela região. O IVP pode ser utilizado para comparar aptidões de regiões, datas de plantio e rotações de culturas mais adequadas. Para compor a formação do IVP, foram avaliados indicadores quanto à aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada e de sequeiro, considerando fatores que representassem a planta, o clima, o solo e a disponibilidade hídrica.

13.2 Balanço hídrico atual e futuro

A escassez hídrica ou estresse hídrico, definida como um “desequilíbrio entre oferta e demanda”, é um problema global que pode afetar a segurança hídrica mesmo em países com amplos recursos hídricos, como é o caso do Brasil. Estima-se que 40% da população rural do planeta vive em bacias hidrográficas classificadas como escassas em recursos hídricos.

O estresse hídrico impacta países de todos os continentes e prejudica a sustentabilidade dos recursos naturais e o desenvolvimento econômico e social. Até

2050, quase 4 bilhões de pessoas poderão estar sujeitas a estresse hídrico severo (Sadoff *et al.*, 2015). Os níveis de retirada de água per capita variam significativamente em todo o mundo uma vez que dependem de vários fatores, como latitude, clima e importância do setor agrícola ou industrial de um País.

O balanço hídrico é uma ferramenta de gestão capaz de identificar pressões e potenciais conflitos que podem incidir sobre os recursos hídricos diante de diferentes cenários. É, portanto, um elemento fundamental para orientar a gestão e o planejamento nas bacias hidrográficas brasileiras, visando garantir a segurança hídrica.

O principal objetivo do balanço hídrico é mostrar o grau em que os recursos hídricos estão sendo explorados para atender a demanda de água de determinada bacia ou região. Ele mede a pressão de uma determinada região sobre seus recursos hídricos e, portanto, o desafio da sustentabilidade do uso da água. O balanço hídrico mostra o quanto os recursos hídricos já estão sendo utilizados e deve sinalizar a importância de políticas públicas eficazes de gestão da oferta e da demanda. O balanço hídrico indica a probabilidade de aumento da competição e conflito entre diferentes usos e usuários da água em uma situação de crescente escassez de água. O aumento do estresse hídrico, evidenciado pelo aumento do valor do indicador, tem efeitos potencialmente negativos na sustentabilidade dos recursos naturais e no desenvolvimento econômico. Por outro lado, valores baixos do indicador indicam que a água não representa um desafio particular para o desenvolvimento econômico e sustentabilidade de determinada região.

Dada a sua grande importância na gestão de recursos hídricos, o balanço hídrico é o principal indicador para emissão de outorgas preventivas e de direito de uso de recursos hídricos. A emissão dessas outorgas no Brasil só é concedida em determinada localidade quando as condições definidas no balanço hídrico forem favoráveis (ANA, 2013b). Essas condições são dadas pelo nível de estresse hídrico definida no local de interesse.

O balanço hídrico também vem sendo utilizado em diversos instrumentos de planejamento de recursos hídricos do Brasil como o PNRH (ANA, 2021) e o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) (ANA, 2019a). No PNSH, o balanço hídrico é a principal variável do Índice de Segurança Hídrica (ISH), aplicada diretamente nos cálculos relacionados às dimensões humana, econômica e ecossistêmica.

O balanço hídrico no Brasil é normalmente estimado pela relação entre demandas e disponibilidades hídricas ($dem/disp$), informando o percentual de comprometimento da oferta de água. A disponibilidade hídrica corresponde à quantidade de água ofertável com uma dada garantia no tempo. Em rios de domínio da União, ela corresponde a uma vazão natural com 95% de garantia (Q95) nos trechos de rio em geral. Nos trechos sob influência de reservatórios, a disponibilidade é tal que, à jusante da barragem de um reservatório, adota-se a sua vazão mínima defluente somada às contribuições de Q95 que afluem a partir dali. Já no lago dos reservatórios adota-se a vazão regularizada deduzida da vazão defluente.

No lago dos reservatórios operados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS), é desconsiderada a capacidade de regularização, adotando-se apenas a vazão Q95 verificada no local das barragens. Eventuais transferências por canais são adicionadas ou subtraídas na rede hidrográfica conforme o caso. A base de disponibilidade hídrica é produzida na ANA e é suscetível à atualização conforme ocorram melhorias metodológicas ou no conjunto de dados primários.

A base de demanda hídrica utilizada em âmbito nacional pela ANA foi obtida do Manual de Usos Consuntivos (ANA, 2019c) que estima as vazões municipais de retirada, consumo e retorno de água pelos setores usuários. Para a realização do balanço entre oferta e demanda, as estimativas de retirada de água municipais foram distribuídas em áreas específicas, conforme o uso, e em seguida espacializadas por ottobacia. A transposição de demandas municipais para ottobacia, como é chamada a microbacias na base hidrográfica da ANA, segue diferentes critérios, de acordo com as melhores informações disponíveis à época de cada consolidação da base nacional pela ANA.

Atualmente, essa alocação espacial possui bom nível de precisão, em função da maior disponibilidade de dados georreferenciados, como: pontos de captação de abastecimento urbano, mapeamentos de áreas irrigadas, mapeamentos de uso da terra, outorgas superficiais e subterrâneas e delimitação de lavras, dentre outros. A modelagem procura atribuir as demandas a partir do cruzamento desses diferentes temas com as ottobacias, dentro do mesmo município.

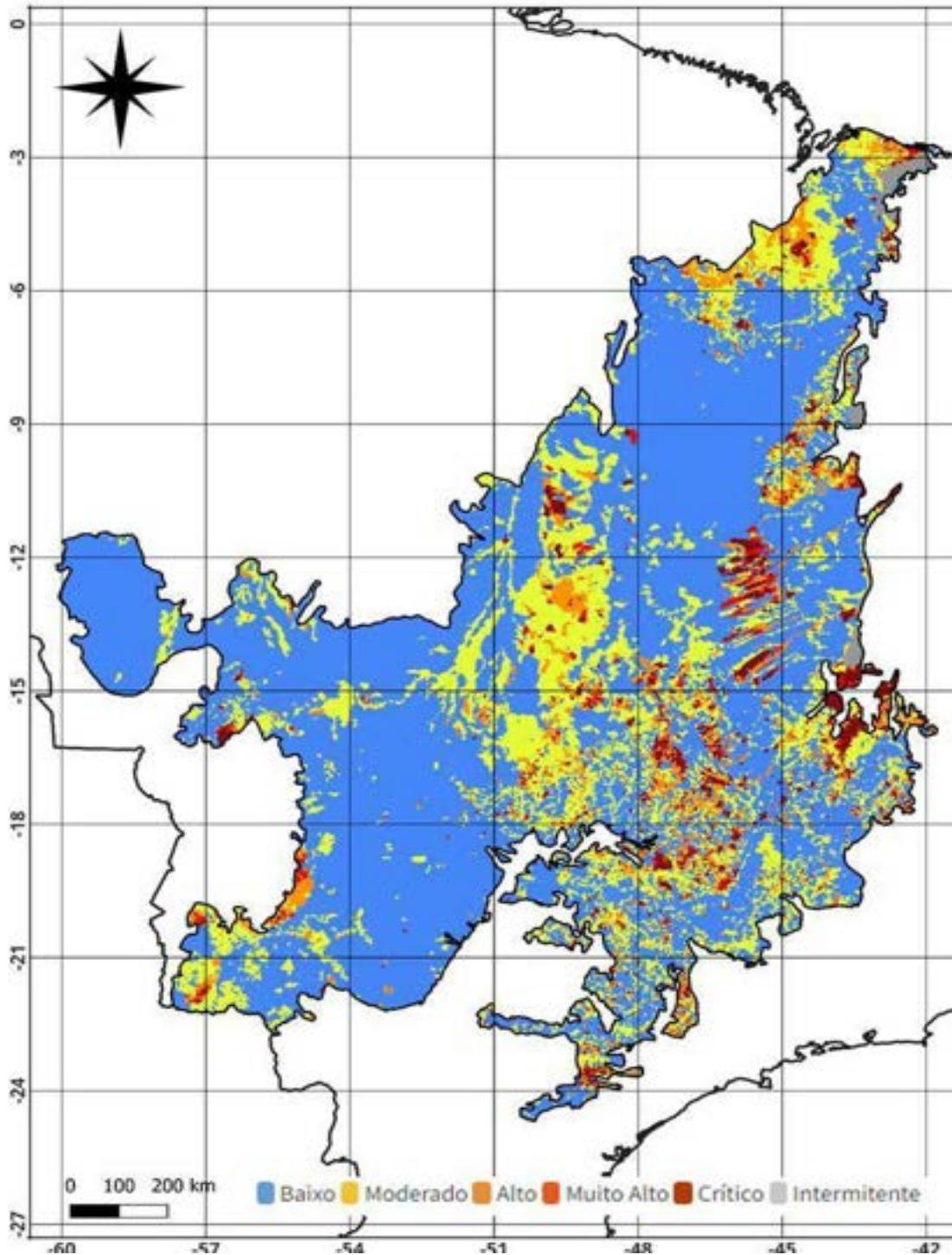
Para fins do planejamento de curto e longo prazos, foram construídos 3 cenários de balanço hídrico no âmbito da atualização do PNRH em 2022 (ANA, 2021): o atual, com demandas de 2020; o futuro, com demandas projetadas para 2040, horizonte do PNRH; e um cenário com mudanças climáticas (Figura 2).

Nos três cenários, o balanço hídrico foi realizado por trecho de rio, classificando-se o nível de comprometimento hídrico dos trechos em: baixo (abaixo de 5%), mediano (5% a 30%), alto (30% a 70%), muito alto (70% a 100%), crítico (acima de 100%) e intermitente (oferta nula). Observa-se que os comprometimentos mais elevados aparecem prioritariamente na porção leste do País, o que coincide com a maior concentração populacional e consequente demanda por água.

No semiárido, dada a baixa garantia de oferta nos rios, a maior parte do território encontra-se na classe intermitente, havendo resultado de balanço nos reservatórios e trechos perenizados. No horizonte de 2040, observa-se, em todas as regiões, uma migração dos trechos para classes de maior comprometimento, com nítida ampliação do nível crítico nas UGRHs Paranaíba e São Francisco. Destaca-se também o avanço do nível mediano em áreas de expansão agrícola nas UGRHs Madeira, Tapajós, Xingu, Paraguai e Tocantins-Araguaia. O cenário com mudanças climáticas se mostra, em geral, amplificador das condições observadas no cenário projetado para 2040.

A Figura 2 ilustra o balanço hídrico no Cerrado realizado pela ANA por trecho de rio considerando o cenário com mudanças climáticas. Esse cenário com mudanças climáticas se mostra, em geral, amplificador das condições observadas no presente.

Figura 2 - Impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico do Cerrado para um cenário crítico em 2040



Fonte: Os Autores (2024).

Para o Cerrado, a partir da avaliação do cenário de mudança (Figura 2), nota-se o aumento ou a redução na disponibilidade hídrica, em diferentes níveis de alteração, tendo como referência a verificação desses níveis na maioria dos trechos de rios da região. Observa-se ainda uma preponderância de trechos com diminuição da disponibilidade hídrica, principalmente nas partes norte e leste da região e um possível agravamento das regiões que hoje já estão críticas em termos de balanço hídrico.

13.3 Pequenas barragens

A humanidade vem construindo reservatórios por meio de barragens ou represas há centenas ou milhares de anos, para os mais diferentes propósitos, desde a produção de energia elétrica, abastecimento de água para uso humano e industrial, irrigação, navegação, lazer e turismo e disposição de rejeitos e sedimentos em mineração ou de resíduos industriais, além de influenciar na regularização de vazões, atenuando os efeitos das enchentes e das secas nos locais onde os reservatórios estão instalados e naqueles sob sua influência (WCD, 2000; Lehner *et al.*, 2011).

Esses reservatórios desempenham um papel fundamental no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A mitigação de inundações, a garantia do abastecimento de água urbana e agrícola e o fornecimento de energia, são bons exemplos que destacam os inúmeros benefícios proporcionados por essas infraestruturas que, em alguma medida, possibilitaram à sociedade melhorar a saúde, aumentar a produção de alimentos e incrementar o crescimento econômico (WCD, 2000; Vörösmarty *et al.*, 2003; Chao *et al.* 2008.; Lehner *et al.*, 2011; Ho *et al.*, 2017). Por exemplo, estimativas recentes apontam que grandes reservatórios são responsáveis diretamente por 12 a 16% da produção global de alimentos (Lehner *et al.*, 2011).

Algumas projeções sugerem que, até 2050, será necessário um aumento de 70% na produção de alimentos, podendo chegar a 100% nos países em desenvolvimento, como o Brasil, para lidar com um aumento de quase 40% na população mundial e acomodar mudanças esperadas nos padrões alimentares globais (Bruinsma, 2009). Parte significativa desse alimento adicional deverá ser produzida em terras irrigadas, o que exigirá 11% a mais de água, sendo boa parte dessa água proveniente de reservatórios.

No Brasil, praticamente todos os grandes reservatórios são construídos com o objetivo principal de geração de energia elétrica. No entanto, de acordo com o levantamento mais recente do projeto “mapeamento dos reservatórios do Brasil” (ANA, 2016), constatou-se a existência de um pouco mais de 170 mil reservatórios no Brasil, sendo que para a maior parte desses reservatórios praticamente não existe nenhuma informação, nem mesmo quanto à sua principal finalidade. A maioria é composta por pequenos reservatórios, com 90% apresentando área superficial inferior a 7,7 hectares (ANA, 2016a; ANA, 2019a).

Atualmente, a melhor estimativa, em termos relativos, dessa finalidade são aquelas apresentadas no último relatório de segurança de barragens (ANA, 2018). Nesse relatório, a partir de uma base de 17.604 barragens cadastradas submetidas ao Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), aponta-se que os usos principais estão associados à irrigação (36%), abastecimento humano (20%), hidrelétrica (14%) e contenção de rejeitos de mineração (10%). Ainda segundo esse relatório, é esperado que no futuro, os números de barragens destinadas à irrigação e abastecimento humano cresçam à medida em que os órgãos fiscalizadores de barragens de acumulação de água classifiquem suas barragens e descubram se elas se submetem ou não à PNSB.

O mapeamento dos reservatórios no Brasil foi executado com o propósito de gerar informações para subsidiar ações de planejamento e gestão do setor de recursos hídricos e integrar a base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Os dados de MDA do Brasil, componente da base hidrográfica otocodificada (BHO) da ANA, corresponde a um dado geo-espacial vetorial que compreende os corpos d'água existentes no território nacional, tais como lagos e reservatórios (ANA, 2016a).

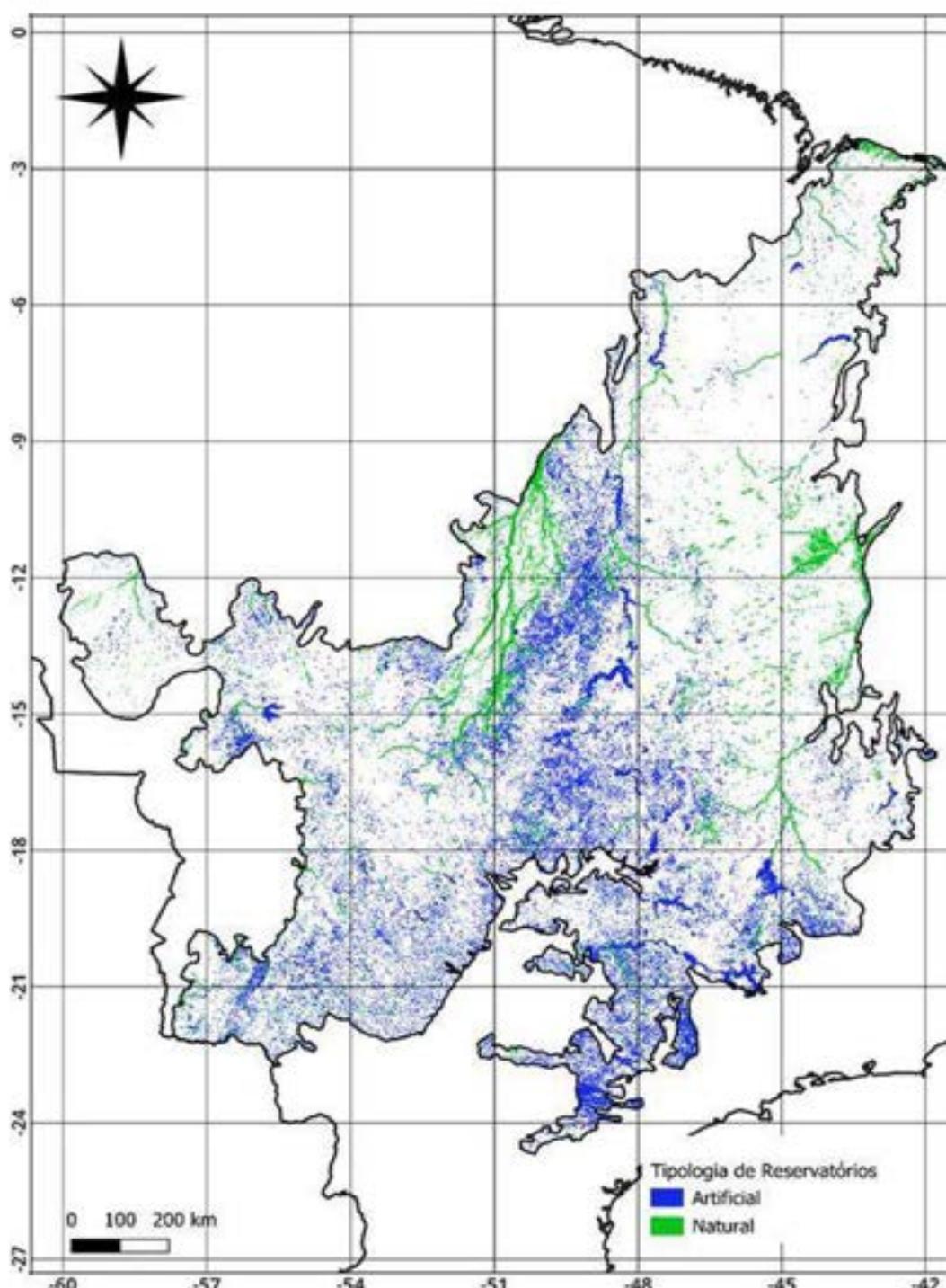
Os reservatórios foram, em uma primeira versão, mapeados com imagens do satélite CCD/CBERS-2 adquiridas entre 2003 e 2006 e a vetorização das feições foi realizada manualmente. Na versão atual, houve uma atualização da base com os reservatórios identificados a partir de imagens de satélite Landsat 8 OLI com 30 metros de resolução espacial, cujo download foi efetuado por meio do portal Earth Explorer do United States Geological Survey (USGS), imagens RapidEye de 5 metros de resolução espacial, disponíveis na ANA e/ou ainda por meio de vetorização sobre serviços Web Map Service (WMS) de imagens de satélite de alta resolução espacial, disponíveis por meio do recurso BaseMap do software ArcGIS® e dos complementos Google Satellite e Bing Aerial do software QGIS.

Na versão 2019, na base de reservatórios no Brasil, consta um total de 240.220 reservatórios mapeados, ocupando uma área superficial total de 173.749,56 km². Dessas, 66.372 (27,6%) são massa d'água naturais e 174.527 são artificiais (72,4%). A área ocupada seguindo essa tipologia compreende 128.165 km² (73,8%) de reservatórios naturais e 41.825 km² (24,5%) de reservatórios artificiais. Nessa base, 15.179 reservatórios apresentam toponímia (nome da massa d'água identificado) e 386 apresentavam o tipo de operação (regularização ou fio d'água). Essa base também apresenta a identificação da capacidade ou volume máximo dos reservatórios, cujas informações foram preenchidas para 3.661 reservatórios. Além disso, a base apresenta também a identificação da data de construção do reservatório, cujas informações foram preenchidas para 745 reservatórios, cuja área ocupada representa 85% da área de os reservatórios artificiais. Destes 745 reservatórios, 314 foram os reservatórios do setor elétrico e para os 431 reservatórios restantes as informações foram de diversas instituições espalhadas no Brasil (como DNOCS e SUDENE por exemplo).

A Figura 3 ilustra cartograficamente a classificação dos reservatórios quanto às tipologias natural ou artificial. Essa base está disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>.

No caso do Cerrado, consta um total de 77.703 reservatórios mapeados, ou seja, cerca de 32% dos reservatórios brasileiros, ocupando uma área superficial total de 26.400,47 km², o que em termos nacionais representa cerca de 15%. Dessas, 20.769 (27%) são massa d'água naturais e 5.6934 são artificiais (73%). A área ocupada seguindo essa tipologia compreende 8.309,67 km² (31%) de reservatórios naturais e 18.090,8 km² (69%) de reservatórios artificiais. Observa-se uma preponderância de reservatórios artificiais na região do Cerrado, principalmente os voltados para o atendimento dos usos agrícola.

Figura 3 - Classificação da tipologia de reservatórios do bioma Cerrado



Fonte: Os Autores (2024).

13.4 Demanda hídrica

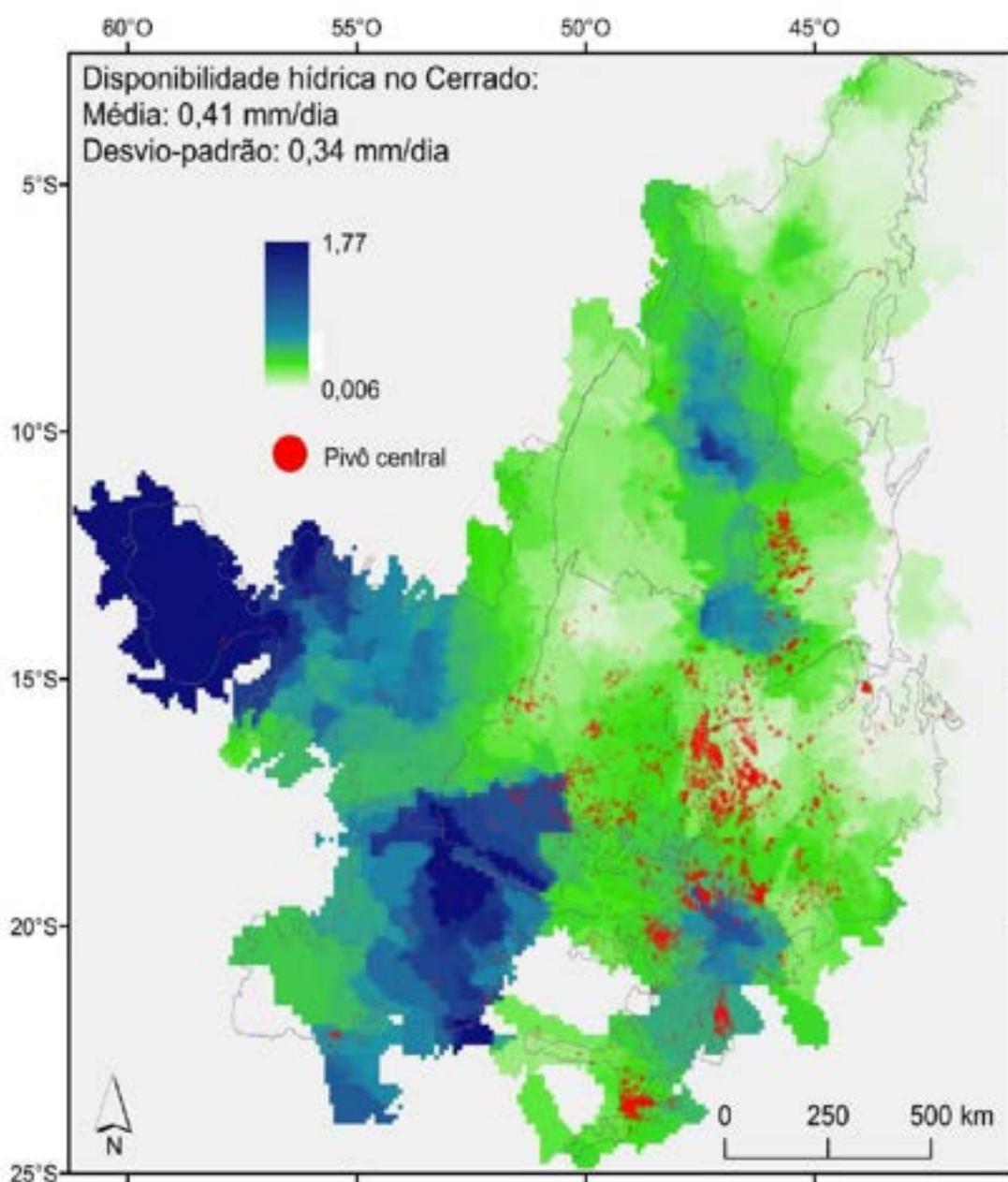
A água é um insumo essencial para a produção agrícola, desempenhando um papel importante na segurança alimentar. Nesse sentido, água e alimento é um binômio fundamental para a sobrevivência do ser humano no planeta. Entretanto, ainda persiste o desafio de se buscar integrar de forma efetiva e estratégica as políticas de segurança hídrica e alimentar, de forma a se trazer estabilidade para a produção de alimentos.

Assim, ao se pensar nonexo água-alimento, é fundamental considerar o papel da agricultura irrigada. A complexidade inerente a essa interação é um dos motivos dos debates e disputas, muitas vezes desnecessárias, entre os setores usuários.

A agricultura irrigada representa cerca de 20% do total de terras cultivadas e contribui com 40% do total de alimentos produzidos em todo o mundo. Na região do Cerrado, a produção agrícola é cada vez mais dependente da irrigação, trazendo para discussão também a questão energética.

O equilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica é a base para segurança hídrica de uma região. Na Figura 4, apresenta-se, de forma conjunta, a localização de pivôs centrais e a disponibilidade hídrica do Cerrado.

Figura 4 - Localização de pivôs centrais do Cerrado identificados pelo Projeto MapBiomas Irriga em 2020 no mapa de disponibilidade hídrica do Cerrado

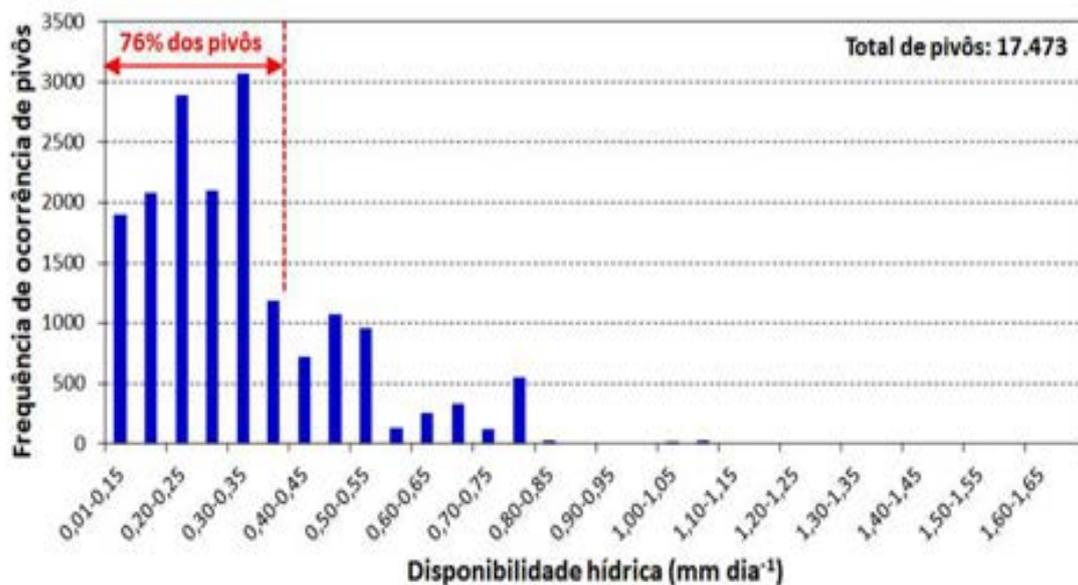


Fonte: Os Autores (2024).

A análise da localização dos 17.473 pivôs centrais, mapeados em 2020, pelo Projeto MapBiomias Irriga (Rudorff, 2023), indica que a maioria dos pivôs estão localizados em áreas já com baixa disponibilidade hídrica (Figura 5), ressaltando a importância de se fazer uma gestão sistêmica, considerando outros indicadores de concessão de outorga.

Os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, que possuem os maiores valores de disponibilidade hídrica, apresentaram baixo número relativo de pivôs (451 pivôs). Mais especificamente, 76% dos pivôs do Cerrado em 2020 localizavam-se em áreas com disponibilidade hídrica abaixo da média do bioma, que é de 0,41 mm/dia.

Figura 5 - Frequência de ocorrência de pivôs centrais do Cerrado identificados pelo Projeto MapBiomias Irriga em 2020 por diferentes classes de disponibilidade hídrica



Fonte: Os Autores (2024).

13.4 Considerações finais

O Brasil é um país com grande aptidão para agricultura. Isso deve ser entendido pela sociedade como um dos nossos mais importantes ativos. Para que o nosso papel estratégico de produtor de alimentos possa ser consolidado, é importante ter segurança hídrica.

As incertezas climáticas, principalmente em relação à chuva, têm dificultado o trabalho de gestão de recursos hídricos, trazendo insegurança hídrica no campo e, consequentemente, insegurança alimentar, comprometendo a qualidade de vida das pessoas.

A irrigação contribui efetivamente para reduzir as incertezas da chuva na produção de alimentos. O seu uso intensivo dos recursos hídricos, entretanto, demanda estratégias diferenciadas de gestão. A agricultura irrigada terá, cada vez mais, que se adaptar a uma sociedade mais dinâmica, exigente quanto à alimentação e quanto às questões sociais e ambientais.

O desenvolvimento de estratégias para enfrentar as variabilidades climáticas e reduzir o risco agrícola, por meio da melhoria da precisão das previsões, do desenvolvimento da agricultura com inteligência climática e de estratégias de adaptação às mudanças do clima, serão fundamentais na busca da sustentabilidade na produção de alimentos.

Pensando nos componentes da oferta hídrica da gestão, deve-se atentar para os sistemas de conservação do solo e restauração de áreas de recarga dos aquíferos, que estão em constante adaptação e evolução. Olhando para o componente da demanda, deve-se melhorar a eficiência de uso de água na irrigação, reduzir perdas na condução, melhorar o manejo do sistema e a eficiência de uso.

O desenvolvimento de qualquer atividade econômica depende da oferta hídrica. É preciso pensar o desenvolvimento de maneira integrada e estratégica, sendo a água elemento central desse debate. Nesse sentido, é importante analisar a capacidade de suporte das bacias hidrográficas e as responsabilidades de cada setor usuário, favorecendo sempre os usos múltiplos e apresentando oportunidade de crescimento para todos. A água não pode ser fator limitante do crescimento, sendo, dessa forma, necessário fazer tanto a gestão da demanda como da oferta hídrica, buscando segurança hídrica para todos os setores.

Referências

- ADAK, T.; KUMAR, G.; CHAKRAVARTY, N. V. K. *et al.* Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica juncea* L.) under semi-arid microenvironments. **Biomass and Bioenergy**, 51, 154-162. 2013.
- AKHTAR, N.; SYAKIR ISHAK, M. I.; BHAWANI, S. A. *et al.* Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. *Water*, 13, 2660. 2021.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A. *et al.* Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133, 395-406. 2007.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p56-61>.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Alternativas organizacionais para gestão de recursos hídricos**. Brasília, DF: ANA, 2013a. 121 p. (Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, v. 3).
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, DF: ANA, 2013b.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Subsídios para a discussão da compatibilização da geração de energia hidrelétrica com expansão da agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF: ANA, 2014. 64 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. Atualização e Complementação da Base de Dados Nacional de Referência de Reservatórios. **Nota Técnica nº 74/2016/SPR. Documento nº: 00000.055912/2016-94**. Brasília/DF: ANA, 2016a.

-
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Estudo de modelagem quantitativa e qualitativa de trechos de rio em bacias hidrográficas consideradas críticas**. Resumo Executivo. Brasília, DF: ANA, 2016b. Disponível em: http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=316&fname=RE_21_12_16.pdf&access=private. Acesso em: 17 de mar. 2017.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2017. 169p.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019a. 112 p.: il. ISBN: 978-85-8210-059-2.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019b. 94 p.: il. ISBN: 978-85-8210-058-5.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019c. 75 p.: il. ISBN: 978-85-8210-057-8.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**: informe anual. Brasília: ANA, 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. 2. Ed. Brasília: ANA, 2022. 112 p.: il. ISBN: 978-65-88101-25-4.
- BASTIAANSSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; ROERINK, G. J.; HOLTSLAG, A. A. M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. **Formulation**. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212.
- BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REIG, F.; LATORRE, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *International Journal Climatology*, 34, 3001–3023. 2014.
- BENTO, V. A.; GOUVEIA, C. M.; DACAMARA, C. C.; TRIGO, I. F.; 2018. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 286–295.
- BIANCALANI, R; MARINELLI, M. **Assessing SDG indicator 6.4.2 ‘level of water stress’ at major basins level**. UCL Open: Environment. 2021; (3):05. <https://dx.doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000026>.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Caderno setorial de recursos hídricos: agropecuária**. Brasília, 2006. 96 p. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao23022011030305.pdf. Acesso em: 17 mar. 2017.
- BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 217 p. 2014.
- BRUINSMA J. **The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050?** Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2009.
- CASAGRANDE, E.; RECANATI, F.; RULLI, M. C. *et al.* Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. *Ecol. Indic.* 121, 107155. 2021.

-
- CESCHIA, E.; BEZIAT P.; DEJOUX J. F. *et al.* Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. **Agr. Ecosyst. Environ.** 139, 363–383. 2010.
- CHAO, B. F.; WU, Y. H; LI, Y. S. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. **Science** 320: 212–14. 2008.
- CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C. *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>.
- FAO. **The future of food and agriculture – trends and challenges**. 2017. Available from: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>.
- GOUVEIA, C.; TRIGO, R. M.; BEGUERÍA, S. *et al.* Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. **Global and Planetary Change**, 151, 15-27. 2017.
- HO, M. U.; LALL, M.; ALLAIRE, N. *et al.* The future role of dams in the United States of America, **Water Resour. Res.**, 53, 2017. doi:10.1002/2016WR019905.
- IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In*: LEE, H.; ROMERO, J. (Eds.), **IPCC, Geneva, Switzerland**, pp. 35-115. 2023.
- KLINK, C. A. Policy intervention in the cerrado savannas of Brazil: changes in land use and effects on conservation. *In*: CONSORTE-MCCREA, A.; SANTOS, E. F. Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives, p. 293-308, 2014.
- LEHNER, B; LIERMANN, C. R.; REVENGA, C. *et al.* High-resolution mapping of the world’s reservoirs and dams for sustainable river-flow management. **Front Ecol Environ**, 9:494–502. 2011.
- LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. How many species are there in Brazil? **Conserv. Biol.** 19, 619–624. 2005.
- MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A. C.; WARDLOWA, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSEA, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, 129-143, 2018.
- MOLDEN, D.; FRENKEN, K.; BARKER, R. *et al.* **Trends in water and agricultural development**. *In*: Chapter 2 in Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, International Water Management Institute, London, Earthscan, Colombo. 2007.
- NYOLEI, D.; NSAALI, M.; MINAYA, V. *et al.* High resolution mapping of agricultural water productivity using SEBAL in a cultivated African catchment, Tanzania. **Physics and Chemistry of the Earth**, 112, 36–39. 2019.
- OLIVEIRA, M. L.; SANTOS, C. A. C.; OLIVEIRA, G. *et al.* 2022. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of the Total Environment**, 835, 2022.

-
- PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M. *et al.* Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286–298, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>.
- REBELLO, V. P. A.; GETIRANA, A.; FILHO, O. C. R. *et al.* Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100294, 2020.
- RODRIGUES, L. N.; CRUVINEL, P. E. Recurso água. Biomas e agricultura: oportunidades e desafios. 1ed. Rio de Janeiro: **Vertente**, 2019, v. 1, p. 197-203.
- RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (Ed). **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017. 327 p.
- RUDORFF, B. **MapBiomas Irrigation – Appendix – Collection 8**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/Irrigation-Appendix-C8.docx.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- SADOFF C. W.; HALL, J. W.; GREY, D. *et al.* **Securing water, sustaining growth. Report of the GWP/OECD Task Force on Water Security and Sustainable Growth**. Oxford, UK: University of Oxford; 2015. Available from: <https://tinyurl.com/36tvddka>.
- SCHEIERLING, S.; TREGUER, D. O.; BOOKER, J. F. **Water productivity in agriculture: looking for water in the agricultural productivity and efficiency literature**. Water Econ Policy (WEP). 2016; 2:1–33. Available from: <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500077>.
- SILVA NETO, S. P.; MOREIRA, C. T.; SILVA, S. A. **Plantio da soja na época certa**. Embrapa, 2010. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/871639>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; GARÇON, E. A. M.; TAKEURA, C. M.; QUARTAROLI, C. F.; ALAVAREZ, I. A. Modeling large-scale biometeorological indices to monitor agricultural-growing areas: applications in the fruit circuit region, São Paulo, Brazil. **Int. J. Biometeorol.** 1, 1–14. 2020a.
- TEIXEIRA, A. H. C.; TAKEMURA, C. M.; LEIVAS, J. F. *et al.* Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.** 18, 1– 9. 2020b.
- TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; STRUIVING, T. B. *et al.* Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agric. Water Manage.** 247, 1– 9. 2021a.
- TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J.; PACHECO, E. P. *et al.* Biophysical characterization and monitoring large-Scale water and vegetation anomalies by remote sensing in the agricultural growing areas of the Brazilian semi-arid region in: *Advances in remote sensing for natural resource monitoring*. 1 ed. New Jersey: **Wiley Online Library** 1, pp. 94–109. 2021b.

VICENTE-SERRANO, S. M.; MIRALLES, D. G.; DOMÍNGUEZ-CASTROM, F. *et al.* Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. **Journal of Climate**, 31, 5371–5393. 2018.

VÖRÖSMARTY, C. J.; SHARMA, K. P.; FEKETE, B. M. *et al.* The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. **Ambio**, 26(4), 210–219. 1997.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MEYBECK, M.; FEKETE, B. *et al.* Anthropogenic sediment retention: major global-scale impact from the population of registered impoundments. **Global Planet Change** 39: 169–90. 2003.

YANG, Y.; GUAN, H.; BATELAAN, O. *et al.* Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Sci. Rep.** 6, 1–8. 2016.

YUAN, M.; ZHANG, L.; GOU, F. *et al.* Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in the semi-arid Inner Mongolia. **Agricultural Water Management**, 122, 28–38. 2013.

WCD (World Commission on Dams). **Dams and development: a framework for decision making**. London, UK: Earthscan. 2000.

ZHANG, X.; ZHANG, B. The responses of natural vegetation dynamics to drought during the growing season across China. **J. Hydrol.** 574, 706–714. 2019.

ZHANG, L.; NIU, Y.; ZHANG, H. *et al.* Maize canopy temperature extracted from UAV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. **Frontiers in Plant Science**, 10, 1–18. 2019.

CAPÍTULO 14

AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO: EFICIÊNCIA, MANEJO E INOVAÇÃO PARA SUSTENTABILIDADE

Everardo Chartuni Mantovani
Gregorio Guirado Faccioli

Resumo

A agricultura irrigada brasileira tem no bioma cerrado sua maior área de expansão, com uso de tecnologia que vem permitindo produção e produtividade com sustentabilidade econômica, social e ambiental, definidos na Lei 9.433 de 1997 e atendendo a agenda 2030 da ONU. A segurança alimentar brasileira e mundial passa pelo desenvolvimento da agricultura irrigada, sendo fundamental a eficiência do uso de água e outros insumos, inseridas nas inovações dos sistemas de irrigação, de manejo e produção. A produção agropecuária no cerrado brasileiro tem uma importância significativa na produção nacional, sendo que um dos elementos que vem contribuindo está o uso da irrigação, que agrega benefícios importantes, propiciando a verticalização da produção, ganhos em produtividade e estabilidade. A agricultura irrigada, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, sendo necessário um adequado planejamento e gerenciamento para que o seu crescimento possa ser feito em base sustentável. Neste sentido, diversos projetos integrados de caracterização da disponibilidade hídrica para irrigação em base a gestão territorial têm sido realizados, trazendo informações que vem subsidiando o crescimento e desenvolvimento em base a segurança hídrica. Estudos sobre a distribuição da agricultura irrigada brasileira indicam a grande concentração das áreas irrigadas no bioma cerrado, destacando-se a irrigação por pivôs centrais, em diversas culturas, sendo que a irrigação não deve ser considerada isoladamente, mas sim como parte de um conjunto de técnicas utilizadas para garantir a produção econômica de uma determinada cultura, com adequados manejos dos recursos naturais. Neste sentido a nova agricultura irrigada do cerrado traz uma visão estratégica relacionada à eficiência do uso de água e da gestão hídrica, auxílio importante na adaptação e a mitigação ao efeito estufa (mudanças climáticas) e auxílio no desenvolvimento de sistemas importantes como plantio direto e ILPF.

14.1 Introdução

A agricultura moderna tem por finalidade a sustentabilidade, onde a produtividade e rentabilidade devem estar associadas à preservação ambiental e a responsabilidade social, atendendo ainda os objetivos do desenvolvimento sustentável da agenda 2030, destacando os objetivos 2 e 13 de “Fome Zero e Agricultura Sustentável” e “Ação contra a mudança global do clima”.

A demanda de alimentos no mundo não para de crescer. Diversos estudos acompanham a evolução da população mundial e apresentam estimativas ao longo das próximas décadas, sendo que essas informações e projeções são utilizadas para avaliar a segurança alimentar global de longo prazo sob uma série de cenários socioeconômicos, de mudanças climáticas, crescimento da produção agropecuária etc.

Um trabalho extenso desenvolvido na Universidade de Wageningen na Holanda (Uma meta-análise da demanda global projetada de alimentos e da população em risco de fome para o período 2010-2050), apresenta uma análise onde avaliaram 57 estudos de evolução da população mundial e de projeção de segurança alimentar global até 2050 e, em cinco cenários representativos concluem que a demanda global total de alimentos deve aumentar de 35% a 56% até 2050 (Van Dijk *et al.*, 2021).

As informações nesse sentido mais divulgadas e aceitas são as dos estudos da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) que estimam uma população mundial entre nove e dez bilhões de habitantes para 2050 e uma necessidade de expandir a produção de alimentos entre 60% e 70%, com a observação de que 90% desse valor deverá vir do aumento de produtividade e apenas 10% do aumento da área plantada (FAO, 2009).

Neste contexto, existe o consenso de que a expansão da agricultura irrigada mundial e em especial a brasileira é uma importante estratégia para que estas demandas sejam atendidas e nem sempre a ampliação da agricultura irrigada tem sido considerada de forma adequada, apesar de ser uma das mais importantes para ampliar a produção. Para isto a eficiência do uso de água e outros insumos é fundamental e as inovações advindas do desenvolvimento da nova agricultura irrigada são fundamentais.

A contribuição do cerrado para incremento da produção agropecuária brasileira é o fator que permitiu o país se consolidar como grande produtor e exportador de alimentos, em 1970 a área ocupada era de cerca de 4,5 milhões de ha e a produção de 5,2 milhões de toneladas de grãos, em 2020 a ocupação subiu para 18 milhões de ha (aumento de quatro vezes) e a produção 100 milhões de toneladas de grãos (aumento de 20 vezes) (TERRACLASS, 2013).

A demanda do desenvolvimento cada vez mais de produção sustentável e tem sido uma busca constante e já conta com cerca de 60% da área cultivada em sistema de plantio direto e integração lavoura, pecuária, produção e floresta (ILPF) tem crescido de forma importante na região (Klink, 2014).

Valores de produção do Cerrado brasileiro tem uma importância muito significativa na produção nacional com valores entre 50-60% da carne bovina, 50-60% da soja, 30-40% do milho, 95-98% do algodão, 45-47% da cana-de-açúcar, 40-45% do feijão, 85-90% do sorgo e 25-30% do café (Bolfe *et al.*, 2020).

Dentre os elementos que vem contribuindo de forma fundamental para as transformações registradas no Cerrado desde a década de 1970 está o uso da irrigação. A agricultura irrigada agrega benefícios importantes a agricultura da região propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. A agricultura irrigada, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, sendo necessário um adequado planejamento e gerenciamento para que o seu crescimento possa ser feito em base sustentável, tanto do ponto de vista ambiental, como social e econômico.

Nesta análise é importante ter em conta uma abordagem objetiva que considera a necessária ampliação significativa da produção de alimentos, fibras e agroenergia só pode ser conseguida com o uso efetivo e eficiente da água, sendo um dos motivos pelo qual temos que proteger os nossos recursos hídricos para conseguir a segurança alimentar necessária. Neste sentido é importante considerar que a tecnologia da irrigação que permite a produção irrigada, proporciona vários benefícios também do ponto de vista do meio ambiente e, tem conexão direta com a inovação.

Os benefícios da agricultura irrigada na geração de emprego e renda, desenvolvimento e bem-estar no meio rural são inquestionáveis, traz o desenvolvimento com maior agregação de renda, otimização dos ativos (terra, máquinas, infraestrutura etc), promove e possibilita a ampliação da infraestrutura, contribui para evitar o êxodo rural forçado e traz segurança alimentar. Desde mais 5 mil anos a irrigação foi motivo de desenvolvimento dos povos, sendo que a necessidade de intensificar a cooperação e desenvolvimento das técnicas de irrigação pode ter sido o estímulo ao maior desenvolvimento das civilizações das regiões fluviais quando comparada com as comunidades agrícolas das regiões montanhosas.

A questão central da irrigação atual, com conceitos bem definidos de sustentabilidade, é que se trata de uma inovação no sistema de produção, que tem evoluído através dos anos e no contexto atual caminha para permitir segurança alimentar com sustentabilidade, nos três focos econômico, social e ambiental. Tudo isto associado a eficiência no uso de água e com adequado acesso aos recursos hídricos superficiais e subterrâneo, tanto do ponto de vista técnico com processos de solicitação bem consubstanciados, como do aspecto legal.

Para isto diversos projetos relacionados a estudos integrados disponibilidade hídrica para irrigação em base a gestão territorial tem sido propostos e realizados, buscando de integrar os diversos elementos envolvidos, ou seja, clima, solo, topografia, disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, usuários em geral e agricultura irrigada em especial, irrigação (sistemas, eficiência, demanda de uso da água), análise de todos os usuários (demandas), caracterização do sistema de produção irrigado, sistemas de plantio e seu impacto no armazenamento de carbono no solo e potencial de crescimento da agricultura irrigada, entre outros. Tudo isso observando os critérios definidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos e suas ferramentas de gestão, principalmente a outorga de uso da água e seu uso racional definidas na Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (Brasil, 1997).

14.2 Contextualização

14.2.1 Caracterização da agricultura irrigada no Cerrado

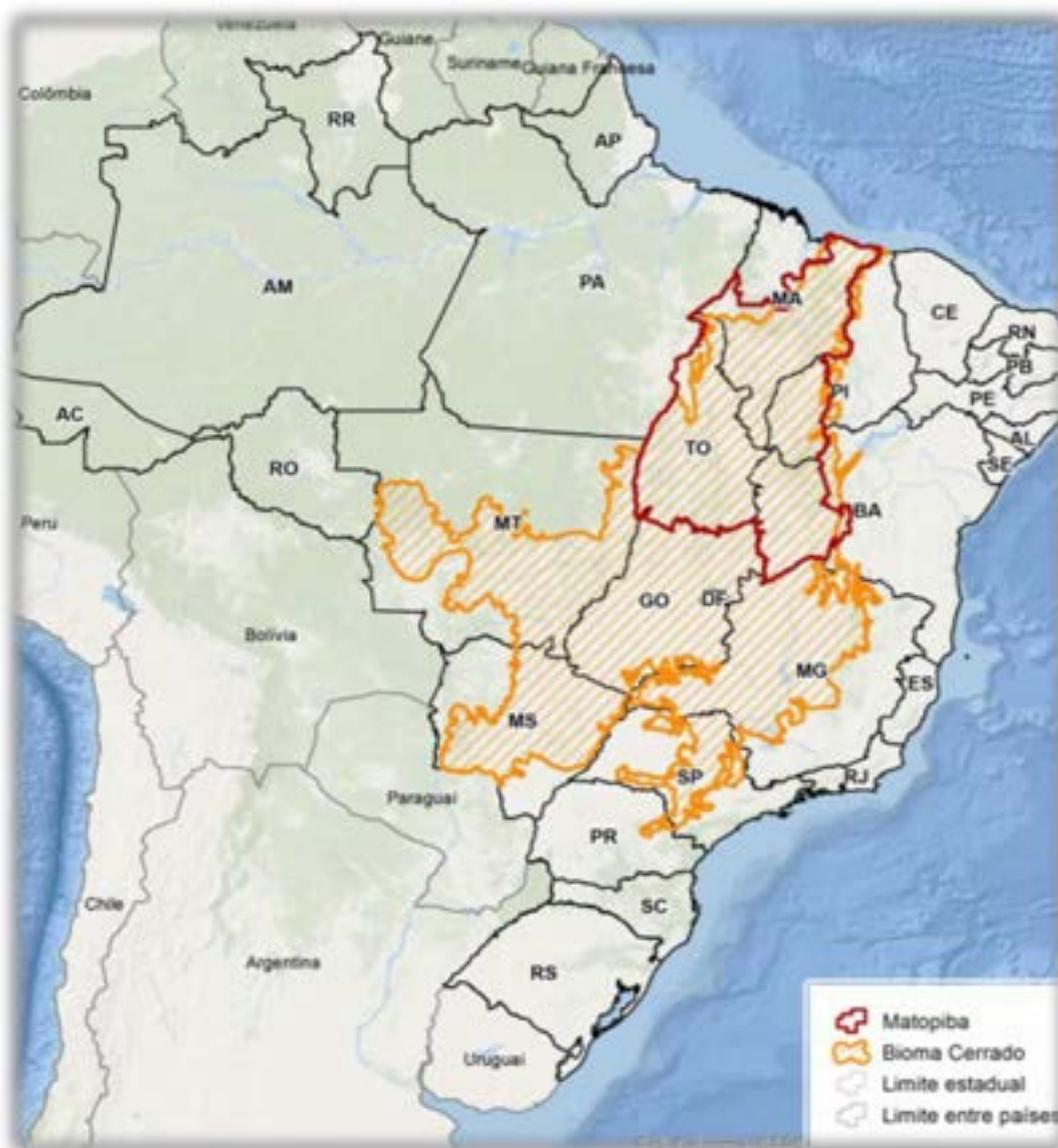
O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil e cobre 24% de seu território, ocupando uma área aproximada de 204 milhões de hectares, região fundamental para a agropecuária do país e o desempenho da agricultura brasileira nas últimas quatro décadas reflete, em grande medida, o extraordinário desenvolvimento desse setor no Cerrado (Klink, 2014; Bolfe, 2020). O clima predominante é o clima tropical com estações seca e chuvosa bem definidas, com presença veranicos, temperatura média anual entre 21,3 e 27,2 °C, relevo plano e suave ondulado que permite uma agricultura mecanizada, o que inclui a irrigação. Possui solos profundos, bem drenados, baixa fertilidade natural e acidez acentuada (Althoff; Rodrigues, 2019).

É notório que na agricultura tropical onde se encontra o cerrado brasileiro os ciclos de produção são definidos pela disponibilidade hídrica, ou seja, dependem da ocorrência das chuvas, que nem sempre se dá de forma regular, no momento e na quantidade certa. Neste sentido, a irrigação é a tecnologia que permite superar esta limitação, permitindo uma agricultura irrigada que valoriza, intensifica e otimiza o uso da terra, proporcionando maior produção, produtividade, rentabilidade, geração de emprego, otimização de ativos, além de outros benefícios. Sem dúvida a irrigação exige investimentos elevados, porém tem se mostrado amplamente viável, por ser a única

tecnologia capaz de duplicar, triplicar ou até quintuplicar a produção por unidade de área de uma safra para outra.

Na Figura 1 a seguir apresenta-se a distribuição do cerrado dentro do mapa brasileiro com a correspondente distribuição dos estados da federação. Este mapa também será importante para caracterizar a área irrigada brasileira dentro deste bioma.

Figura 1 - Distribuição do Cerrado dentro do mapa do Brasil com a respectiva distribuição dos estados da federação



Fonte: Terraclás (2015).

A seguir apresenta a distribuição da área irrigada brasileira separadas por tipologia de cultura e sistema de irrigação envolvendo arroz, pivôs centrais, fruticultura e cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada, pivôs e outros métodos em grãos, arroz e café desenvolvida pela Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA, 2021). Trata-se de um estudo muito completo e que permite uma análise estratificada da agricultura irrigada brasileira e da sua importância.

Figura 2 - Caracterização da distribuição da área irrigada brasileira por tipologia de cultura e sistema de irrigação envolvendo: arroz inundado (1), Pivôs centrais (2), Fruticultura e cana (3), Cana-de-açúcar irrigada (4a) e fertirrigada (4b), Pivôs e outros métodos em grãos (5), arroz, cana e pivôs (6) e Café e pivôs (7)



Fonte: ANA (2021).

Comparando as Figuras 1 e 2 é possível observar a grande concentração das áreas irrigadas no bioma Cerrado, destacando-se a irrigação por pivôs centrais, cana-de-açúcar irrigada, café, arroz inundado (Tocantins) e outros sistemas.

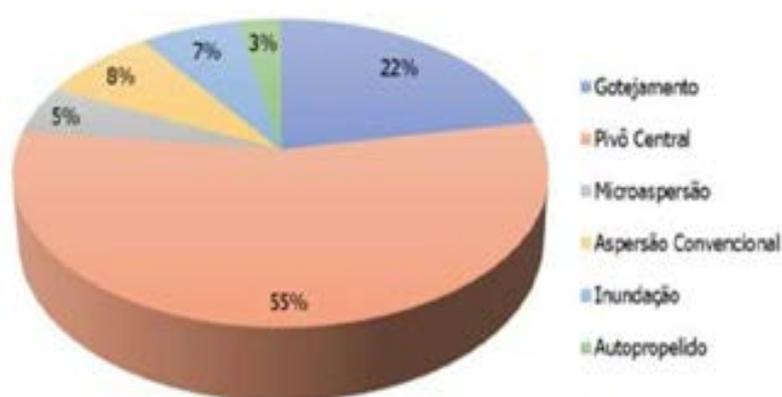
Em todo esse desenvolvimento da região do Cerrado, a agricultura irrigada tem um espaço especial, sendo a grande fronteira da irrigação por aspersão mecanizada do tipo pivô central. Foi no bioma que essa tecnologia encontrou uma grande área de expansão, graças ao clima, relevo, disponibilidade hídrica e tipos de solo, que lhe permitem ocupar extensas áreas de milho, soja, algodão, feijão, pastagem, café, batata, cana e, nos últimos anos, chegar até a lavouras de trigo.

Devido à sua alta facilidade operacional, de automação, eficiência de aplicação de água, durabilidade e capacidade de irrigar grandes áreas, o pivô central ocupou o espaço que tem hoje em toda região do Cerrado e, em especial, nas áreas do MATOPIBA (cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), com destaque para o Oeste da Bahia e áreas complementares nos demais estados. Em Minas Gerais, está presente no Noroeste, Norte e Triângulo Mineiro. Em Goiás, chega a Rio Verde e Cristalina, enquanto em Mato Grosso predomina mais ao sul.

Todo este cenário vem permitindo planejamento, implantação e operação de áreas irrigadas do sul a norte do Brasil, sendo que atingimos 8,2 Mha em 2019 (ANA, 2021) e 9,2 Mha em 2022 (ANA, 2021; CSEI/ABIMAQ, 2022; 2023). O que foi proporcionado pelo forte crescimento de 250 e 370, mil ha, em 2020 e 2021, também de 2022 com 440 mil novos hectares irrigados, sendo 406 mil de pivô central, carretel e localizada e 34 mil ha de aspersão convencional.

Na Figura 3 apresenta-se a porcentagem correspondente ao uso de diferentes sistemas de irrigação no Cerrado em 2019 (IBGE, 2019). Observa-se que os sistemas gotejamento e pivô central ocupavam 77% da área irrigada. Estes dois sistemas, representaram uma área de 0,36% (0,74 Mha) da área total do Cerrado em 2019, sendo que em 2022, somente a área com pivô central, atingiu a marca de 1,35 Mha.

Figura 3 - Área ocupada com diferentes sistemas de irrigação no ano de 2019 no Cerrado



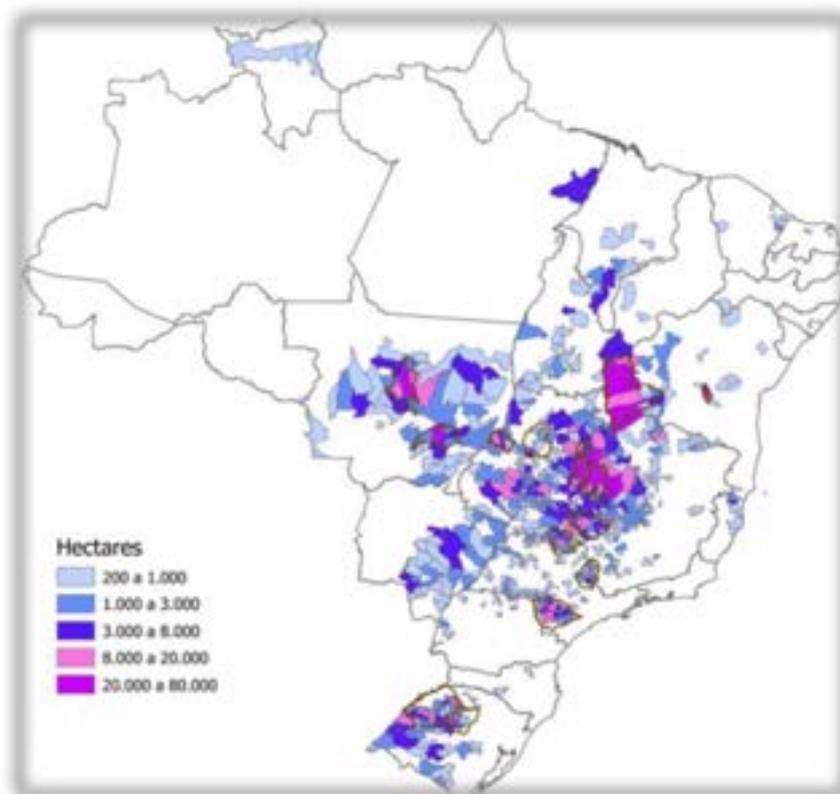
Fonte: IBGE (2019).

Althoff e Rodrigues (2019) discutem com a irrigação desempenha um papel fundamental na produção de alimento e desenvolvimento socioeconômico local no Cerrado e citam que em função da topografia geralmente plana e grandes áreas plantadas com culturas anuais, o pivô central, por sua automação e uniformidade de aplicação, é o sistema de irrigação mais utilizado, concentrando a região do Cerrado cerca de 80% de todos os pivôs centrais do Brasil.

Estudo da ANA (2023) cita que o Brasil superou os 30 mil pontos-pivôs em 2022, ocupando uma área equipada de 1,92 milhão de hectares (Mha). Em relação a 2019, houve incremento de 370 mil hectares (+24%) e, em relação a 2010, de mais de 1 milhão de hectares (+225%). Citam que dentre os biomas, o Cerrado responde por 70,4% (1,35 Mha), sendo que os demais biomas Mata Atlântica, Pampa, Caatinga e Amazônia respondem, respectivamente, por 11,1%, 9,4%, 5,4% e 3,7% da área equipada de pivôs. Os estados de Minas Gerais (29,2%), Goiás (16,3%), Bahia (15,3%), São Paulo (12,9%), Rio Grande do Sul (10,2%) e Mato Grosso (8,6%) concentram 92,5% da área equipada de pivôs no Brasil.

Na Figura 4 a seguir é possível verificar de maneira clara como a região do cerrado concentra a maior parte dos pivôs instalados no Brasil.

Figura 4 - Mapa com a distribuição dos pivôs centrais no Brasil em 2022



Fonte: ANA (2023).

Em relação a outros sistemas de irrigação e diversas culturas irrigadas a ANA (2021) informa um total de 1.345.784 ha correspondendo ao total de 25,0% da área irrigada utilizando águas de mananciais superficiais ou subterrâneo. Inclui os sistemas de irrigação localizada por gotejamento e microaspersão e aspersão convencional em suas diversas modalidades móveis (mais comum) e fixas.

Dentre as principais culturas irrigadas, destaca-se a irrigação de citros (laranja, limão e tangerina) que ocupam cerca de 85 mil ha; de banana (85 mil ha); tomate (45 mil ha); manga (44 mil ha); e melão e melancia (62 mil ha). Coco, maracujá, mamão, uva, goiaba e pimenta-do-reino ocupam em conjunto cerca de 100 mil ha irrigados. Ou seja, predominam nessa tipologia produtos da fruticultura e da horticultura, que são proporcionalmente mais irrigados (70 a 90% da área cultivada é irrigada) do que as principais culturas irrigadas em números absolutos (grãos). Inclui também as culturas milho, feijão, algodão e soja que são predominantemente irrigadas por pivôs centrais, mas que nas pequenas propriedades e estão incluídas nessa tipologia. Em itens posteriores será contextualizado a distribuição destes sistemas no bioma Cerrado.

Uma importante cultura irrigada no Cerrado é a cana-de-açúcar em condições irrigadas, apesar de boa parte das regiões com cana no Brasil apresenta condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura sem irrigação, observa-se grandes expansão em condições de irrigação suplementar em determinadas regiões do cerrado com maior deficiência hídrica. Também em áreas de menor deficiência hídrica o uso da irrigação tem se intensificado com o objetivo de ganhar produtividade ou para dispersão dos efluentes dos processos industriais, em especial a vinhaça (ANA, 2021).

Atualmente, a cana-de-açúcar possui 3,66 milhões de hectares (Mha) equipados para irrigação, sendo a maior parte (2,9 Mha ou 79,5%) realiza apenas fertirrigação. Outros 749 mil hectares (20,5%) são irrigados com água de mananciais, sendo 76% por salvamento, aplicação de lâminas totais pequenas da ordem de 60 até 100 mm/safra, normalmente após o corte para favorecer a brotação e, 24% com irrigação suplementar e plena (ANA, 2021). A irrigação suplementar é muito usada na região do cerrado com valores de lâminas da ordem de 300 mm/safra e a irrigação plena em áreas do semiárido com valores de 600 a 1000 mm/safra (Mantovani, 2003).

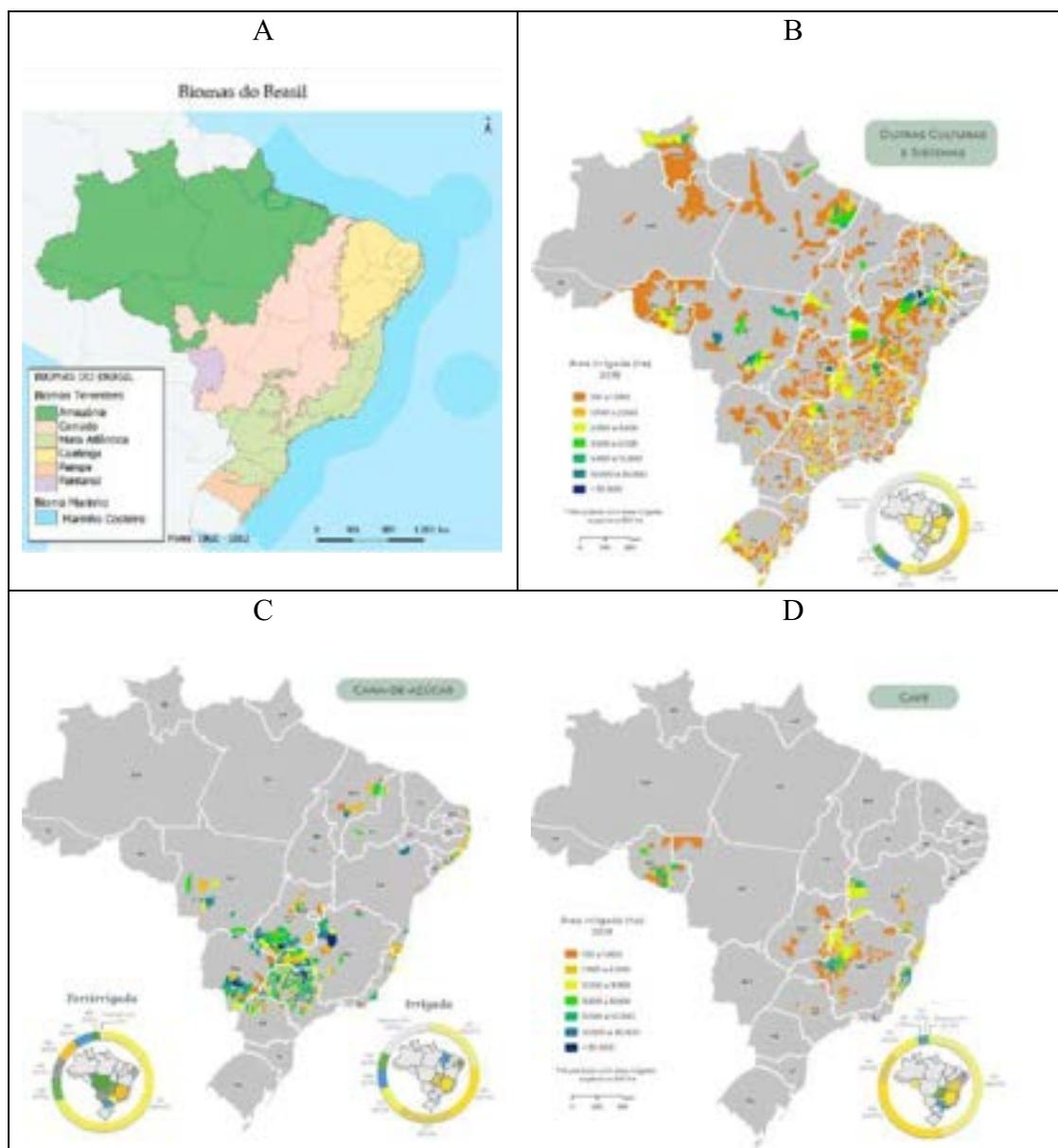
Outra importante cultura irrigada principalmente em condições de cerrado é o café. No Brasil a cafeicultura irrigada representa quase 450 mil hectares, pouco mais de 12% do parque cafeeiro. Porém, estima-se que as áreas irrigadas são responsáveis por 30% da produção nacional de café, graças às grandes vantagens do controle do déficit hídrico em momentos importantes da cultura com formação da floração e dos frutos.

O levantamento consolidado pelo Atlas de Irrigação (ANA, 2021) identificou 449,3 mil hectares irrigados de café no Brasil correspondendo a 25% da área plantada. Em termos relativos, o Espírito Santo lidera com 46,2% da área irrigada (principalmente com o café conilon), seguido por Minas Gerais (29,9%), Bahia (10,2%), Rondônia (9,6%), São Paulo (2,0%) e Goiás (1,7%). Informa ainda o estado de Goiás é mais dependente da irrigação (quase 100% dos cafezais), seguido por Espírito Santo e Rondônia (60 a 70% dos cafezais são irrigados) e Bahia (40%). Minas Gerais, responsável por 50% da produção nacional, tem 14% de seus cafezais irrigados; e São Paulo apenas 4%.

Na Figura 5 é possível observar que a distribuição da área irrigada principalmente de fruticultura e olericulturas pelos sistemas localizados e aspersão convencional (B), cana de açúcar (C) e café (D) em relação ao bioma cerrado e demais.

Observa-se na Figura 5 que as áreas irrigadas principalmente de fruticultura e olericulturas pelos sistemas localizados e aspersão convencional (B) não se concentram no Cerrado e se distribui para outros biomas com destaque para Mata Atlântica e Caatinga. Já as áreas irrigadas de cana de açúcar (C) e café (D) destaque para o bioma Cerrado.

Figura 5 - Mapa com a área dos biomas brasileiros (A), área irrigada principalmente de fruticultura e olericulturas pelos sistemas localizados e aspersão convencional (B), cana de açúcar (C) e café (D)



Fonte: ANA (2021).

14.3 Eficiência e Manejo de irrigação na agricultura irrigada

A irrigação não deve ser considerada isoladamente, mas sim como parte de um conjunto de técnicas utilizadas para garantir a produção econômica de uma determinada cultura, com adequados manejos dos recursos naturais, devendo ser levado em conta os aspectos de sistemas de plantios, de possibilidades de rotação de culturas, de proteção dos solos com culturas de cobertura, de fertilidade do solo, de manejo integrado de pragas e doenças, mecanização, etc., perseguindo-se a produção integrada e a melhor inserção nos mercados. Sem dúvida, esse conceito de irrigação necessita de um programa muito bem elaborado de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para o seu estabelecimento e durabilidade (Bernardo *et al.*, 2019).

O futuro da irrigação depende/envolve produtividade e rentabilidade além de uma melhoria na eficiência no uso da água, energia e insumos, respeito ao meio ambiente e uma adequada gestão de recursos hídricos. Assim a análise da agricultura irrigada no cerrado passa pelo entendimento da eficiência do uso da água em dois níveis, o primeiro relacionado pela eficiência do sistema de irrigação e pelo manejo em campo e em segundo lugar pela eficiência no sistema de captação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Neste item vamos abordar a questão da eficiência relacionada ao sistema de irrigação e seu uso. Nesta questão é importante entender que a escolha de um método e ou sistema de irrigação deve ser baseada na viabilidade técnica, econômica do projeto e ambiental, devendo ser considerado entre outros aspectos a uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação de água do sistema a ser utilizado.

Após a instalação do sistema ele terá uma eficiência de irrigação que vai ser definida pela interação da qualidade do sistema de irrigação (relacionada ao potencial de perdas por evaporação, arraste vento e distribuição da água no campo) e sua interação com as condições edafoclimáticas. Por outro lado, é importante considerar que a operação do sistema no dia a dia pode afetar a eficiência do uso da água, tal etapa é denominada de gerenciamento ou manejo da irrigação, onde definições adequadas de quando e quanto irrigar devem ser feitas em base técnica e científica, considerando climáticos, do solo, da cultura, do objetivo da exploração, fatores operacionais e econômicos, tendo sempre a visão de sustentabilidade ambiental, econômica e social.

A eficiência de aplicação de um sistema de irrigação, definida como a relação entre a quantidade de água armazenada no sistema radicular e a quantidade total derivada da fonte, é um dos parâmetros mais utilizados para avaliar o seu desempenho, sendo a eficiência de irrigação o resultado combinado da eficiência de aplicação e distribuição (Bernardo *et al.*, 2019).

Valores inadequados de uniformidade de distribuição (parâmetro de desempenho do sistema associados à variabilidade espacial da lâmina aplicada) e de eficiência de aplicação acarretam uma eficiência de irrigação não satisfatória, gerando um maior uso de água e energia, além de promover perdas significativas de produção e outros danos ao cultivo. Com isso faz-se necessário uma maior discussão em torno da eficiência de irrigação, visando elaborar estratégias de projeto e manejo que possam minimizar tais perdas e garantir uma melhor eficiência do sistema.

A uniformidade de distribuição e o controle da aplicação da água são os dois maiores pré-requisitos técnicos para uma boa irrigação. Observa-se, de forma geral, que a falta de controle adequado dos sistemas de irrigação implica em distribuições de água com baixa uniformidade, abaixo do potencial do sistema, indicando que o desempenho do sistema não depende somente da qualidade do projeto e dos materiais, mas também da ocorrência de entupimentos, da operação e da manutenção. A uniformidade se torna mais importante quando se aplica nutrientes e controles fitossanitários via água de irrigação.

Dois conceitos são importantes para a compreensão do termo eficiência de irrigação, lâmina líquida (LL) e lâmina bruta (LB). A LL representa a lâmina necessária para repor no solo as perdas de água de um certo período, coincidindo com parte ou total do valor da evapotranspiração da cultura, dependendo da estratégia de produção e sensibilidade da cultura ao estresse hídrico. Já a LB pode ser definida como a quantidade de água a ser aplicada para suprir a lâmina líquida e as perdas durante a aplicação (evaporação, arraste pelo vento, desuniformidade da aplicação de água. Assim, a lâmina

bruta é obtida dividindo a lâmina líquida pela eficiência de irrigação. A eficiência de irrigação varia muito em função do sistema utilizado, das condições climáticas e de manejo, do solo, da planta, etc.

Na realidade desde o momento em que a água é captada ela está sujeita a ser “perdida”. Primeiramente essa perda pode ocorrer durante a condução da água, pois pode haver alguma forma de vazamento (em tubulações), evaporação e infiltração (em canais). Durante a aplicação da água, está também pode ser perdida pelo processo de evaporação ou arraste pelo vento. Após a aplicação da água podemos perdê-la devido aos processos de escoamento superficial, percolação e através de inconformidades na distribuição de água (uniformidade). Importante ter em conta que estas modalidades de perda estão cada vez controladas pelas tecnologias de controle, revestimento de canais e reservatórios, tecnologia de aplicação da água (emissores de alta performance), avaliações periódicas entre outros, não só pelo cuidado que os recursos hídricos exigem, mas também pelo custo da energia para transportá-la e aplicá-la às plantas.

Assim, a perda de água por vazamento, cada vez menos importante em função da tecnologia atual de componentes, acessórios, sistemas de controle e de implantação em campo, precisa ser analisada e avaliada, sendo função principal das condições de manutenção e operação do projeto. Em condições de boa manutenção, elas são insignificantes e normalmente menores que 1%. Tais perdas são analisadas pela eficiência de condução de água (E_c) e nos sistemas atuais, além da questão da manutenção, podem ocorrer por desgaste ou falta de sistemas de proteção adequados como válvulas e outros instrumentos.

Outro importante componente é a eficiência de aplicação que reflete as perdas causadas pela evaporação da água e pela deriva e arraste das gotas pelo vento no trajeto entre os emissores e o alvo a ser irrigado. Assim as gotas arrastadas pelo vento podem evaporar enquanto estão sendo transportadas ou sair da área irrigada, constituindo perdas em ambos os casos, já que a água não fica disponível para as plantas que estão sendo irrigadas. Assim, conhecimento do desempenho de um sistema de irrigação, em relação aos índices de eficiência de aplicação é extremamente relevante e útil no processo de tomada de decisão, o que vai possibilitar de maneira direta um uso mais racional e eficiente de água, energia e fertilizantes.

Outro importante fator é a qualidade da distribuição da água na área irrigada pelos sistemas de irrigação. Na irrigação por aspersão, a água é aplicada na forma de uma precipitação artificial, caindo na superfície do solo com uma certa uniformidade decorrente do projeto realizado. Esta uniformidade com que a água é aplicada é consequência de diversos fatores como: seleção adequada do aspersor, pressão de serviço, ângulo de inclinação, espaçamento adotado nos cálculos, condições climáticas e condições predominantes de direção e velocidade do vento no local. A integração das lâminas aplicadas em sistemas móveis de aspersão (pivô central, linear e autopropelidos) proporciona melhores uniformidades que os sistemas estacionários.

Já em sistemas de irrigação localizada, devidos suas características, a uniformidade de distribuição é o fator que mais impacta na eficiência de irrigação, tendo em vista sua forma de aplicação, baixas vazões, maior proximidade do solo, fazendo com que as perdas por evaporação e arraste e na condução sejam praticamente desprezíveis. Neste caso, o principal problema relacionado a uniformidade de aplicação de água se refere ao potencial de entupimento em função das saídas de água serem pequenas e, pode influir o problema da disponibilidade de pressão no sistema, que fora dos valores adequados, pode afetar a qualidade de funcionamento do emissor.

Importante considerar a possibilidade de entupimento com fertirrigações realizadas de forma inadequada.

É necessário o estudo tanto da forma quanto do modo como a água está sendo aplicada nas plantas. Os resultados obtidos podem determinar as melhorias e as modificações a serem adotadas, mais práticas e econômicas, contribuindo para a conservação do solo e da água, diminuindo-se o trabalho necessário. Contribuem também para aumentar a produção das culturas, com uma irrigação mais uniforme. Em geral, a baixa eficiência nos projetos de irrigação por aspersão está relacionada com a desuniformidade de aplicação d'água e com a perda d'água por evaporação e por arrastamento pelo vento, neste sentido a indústria tem dedicado de forma objetiva nos últimos anos ao desenvolvimento de aspersores cada vez mais eficiente do ponto de vista de uniformidade de aplicação e diminuição das perdas por evaporação e arraste.

Nos sistemas de irrigação localizada este conceito é um pouco mais fácil de ser compreendido, pois grandes partes da perda de água são evitadas pelas próprias características do sistema. Quando os sistemas de irrigação localizados têm uma boa manutenção e operação correta, a eficiência de irrigação mantém-se elevada ao longo dos anos.

Após a discussão anterior, precisamos focar que o sucesso da irrigação do ponto de eficiência no uso da água está relacionado à condução da irrigação ao longo do ciclo de produção, tanto sob o ponto de vista de qualidade da aplicação (eficiência de irrigação), como sob o ponto de vista de eficiência na tomada de decisão, decidindo a melhor data e a lâmina mais adequada para cada situação em condições de campo, que denominamos manejo da irrigação ou gerenciamento da irrigação.

Por muitos anos, o termo manejo da irrigação foi omitido das discussões e negligenciado na prática do campo. Devido à conflitos e pressões pelo uso da água, custos de produção elevado e uma melhor percepção dos benefícios agronômicos e econômicos que um manejo eficiente pode trazer para a atividade, a discussão sobre o manejo da irrigação se tornou realidade, sendo importante ter claro que a otimização do uso da água e a rentabilidade de um determinado sistema de produção vão na mesma direção.

Mesmo considerando a melhora dos sistemas modernos de irrigação, com a maior eficiência de distribuição da água nas mais diversas situações, a falta de um programa de manejo pode levar tudo a perder. Seja pela aplicação em excesso ou em falta, antes ou depois do momento adequado para cada fase da cultura e situações vigentes. A questão que se apresenta é de que adianta o desenvolvimento de sistemas cada vez mais precisos e eficientes se os irrigantes não tiverem um sistema moderno e eficiente para definir o momento adequado de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada.

No adequado manejo da irrigação procura-se melhorar ou, no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo, prolongando-se, dessa forma, o período de vida útil do projeto. O manejo correto da irrigação envolve três etapas distintas e complementares:

- a. definição correta das datas e das lâminas de água a serem aplicadas (parte básica);
- b. definição das metas de eficiência de aplicação da água para o sistema, e ajuste do funcionamento deste para atingir esses limites;

-
- c. manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos e sistemas, para que tenham condições adequadas de funcionamento.

As características, funcionamento e potencialidades de um sistema de irrigação são aspectos que não podem ser negligenciados, pois eles têm influência direta no manejo. Por exemplo, o pivô central apresenta características de aplicação de água distintas com relação à aspersão convencional, que por sua vez difere da irrigação localizada. Os métodos de programação de irrigação podem ser divididos em três grupos:

- (i) Os que se baseiam unicamente no conhecimento do estado hídrico do solo, ou seja, no manejo da água útil do solo e do nível de esgotamento permissível. Qualquer equipamento para monitoramento da umidade do solo pode ser utilizado neste método como: blocos de gesso, tensiômetros, medidas diretas, sondas TDR, sondas FDR, etc.
- (ii) Os que se baseiam nos conhecimentos do estado hídrico da planta, seja de forma direta, como é o caso da câmara de tensão xilemática, seja de forma indireta, através de sua temperatura como indicador do estresse hídrico da planta, sistemas muito potencializados com uso de sensoriamento remoto.
- (iii) Os que se baseiam na variação do balanço hídrico do conjunto solo-planta-atmosfera. Esta variação pode ser feita em superfícies muito reduzidas, como é o caso da pesquisa que utiliza os lisímetros ou, em unidades maiores, parcelas ou zonas de irrigação, com diferentes níveis de precisão.

Para que haja sucesso de um empreendimento de irrigação, ou sustentabilidade da produção e produtividade, vários aspectos devem ser considerados, como o manejo adequado do solo e da cultura, entre outros. Especificamente do ponto de vista da irrigação, quatro etapas são fundamentais para este êxito da produção irrigada: (i) qualidade do projeto, (ii) do equipamento, (iii) da implantação e finalmente do (iv) manejo do sistema no campo. Considerando a situação atual da indústria, dos equipamentos disponíveis e das empresas prestadoras de serviços, verifica-se que os três primeiros pontos estão ao alcance do produtor, que utiliza os mesmos sistemas utilizados nos países de maior desenvolvimento socioeconômico.

Sem dúvida, a etapa que exige maior atenção e cuidados seja o manejo da irrigação (iv), ou seja, a condução da lavoura irrigada definindo-se de forma precisa as necessidades hídricas da cultura, a lâmina e a data de irrigação mais adequadas, programa de manutenção preventiva e operativa, treinamento do pessoal e anotação das informações e decisões tomadas em um sistema de manejo e gestão das informações.

A implantação de um programa de manejo apresenta várias vantagens, destacando-se: aumento da produtividade, aumento da rentabilidade, ampliação da área irrigada, otimização da utilização da mão-de-obra, energia elétrica, nutriente e outros insumos e preservação do meio ambiente.

Como princípios importantes deve-se lembrar que o manejo da irrigação envolve a interação do solo, da água, do clima, com a planta a ser cultivada, sendo por isso, impossível definir uma receita geral. Dessa forma, é imprescindível que se tome cuidado com generalizações e transposições de critérios e recomendações. Uma simplificação metodológica pode redundar em grandes limitações na precisão e na continuidade do processo. Por outro lado, deve-se considerar que o emprego da metodologia de campo (em condições de fazenda) e o sucesso do processo implantado dependerá das análises e decisões diárias, realizadas no local, com pessoal nem sempre qualificado para o tema,

sendo necessário um bom sistema informático de auxílio no processo de decisão. Nesse ponto é fundamental considerar que qualquer que seja a proposta de manejo, esta deverá levar em conta os aspectos técnicos e operacionais. Tais considerações parecem óbvias, mas observa-se que muitos insucessos em programas de manejo advêm da falta de compreensão dessas questões operacionais, que são um importante alerta para o especialista responsável pelo sistema de produção.

A implantação de um programa de manejo de irrigação requer conscientização, com visão integrada, tecnologia de ponta e operacionalidade, além de possibilitar a otimização do uso de insumos, aumento da produtividade e rentabilidade e ampliação da área irrigada em locais com limitação dos recursos hídricos, e ainda contribui para implantação de exploração sustentável, preservando o meio ambiente pela utilização adequada da água e energia, não promovendo percolação profunda, lixiviação de produtos químicos e contaminação do lençol freático. Neste ponto, torna-se importante conhecer a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 que define a Nova Política Nacional de Recursos Hídricos.

Dentro desta linha de raciocínio, um conceito importante que define bem a estrutura necessária é que, a agricultura irrigada é diferente da agricultura de sequeiro mais água. Deve-se considerar a agricultura irrigada como uma nova agricultura, em que o fato de aplicar água no momento certo (um dos insumos essenciais) permite e exige mudanças de postura importantes, questionando-se e mudando conceitos como, por exemplo: o que plantar, como plantar, época de plantio, espaçamento, adubação (quantidade, produto, época e forma de aplicação), tratamento fitossanitário, comercialização, política de preço, produção integrada etc.

Assim, é importante implantar um programa que tenha uma visão integrada, e que os questionamentos (de quando e quanto irrigar) estejam dentro de um conceito mais amplo, que permita a consideração de outros componentes, além do aspecto de versatilidade e operacionalidade, considerando a avaliação e manutenção do sistema de irrigação, a fertirrigação, o controle fitossanitário, o manejo e a condução da cultura etc. É importante frisar que implementar um programa de manejo significa, entre outras coisas, implantar um sistema de programação ou monitoramento, que, como citado anteriormente, pode ser via solo, clima, planta, ou associação entre eles.

Existem diversos sistemas de manejo disponíveis no mercado, alguns aplicados por empresas (*Valley Scheduling*, Sistema Irriga e outros) e outros sistemas livres de uso para pesquisa e ensino como o Irriplus, Irrisimples, SBMI (Sistema Brasileiro de Manejo de Irrigação).

14.4 A nova agricultura irrigada do Cerrado

A irrigação é uma técnica milenar e analisar os avanços na irrigação do cerrado associadas a tecnologia é necessário ter em conta que “novidade” é a adaptação e o desenvolvimento de sistemas, acessórios, nova visão que procure ajustar a importância da tecnologia as demandas do momento atual e futuro. Neste sentido a inovação trata-se na nova visão estratégica da eficiência do uso de água na agricultura irrigada e de gestão da disponibilidade hídrica, auxílio com a adaptação e a mitigação ao efeito estufa e assim das mudanças climáticas, auxílio no desenvolvimento, na adaptação e da viabilidade de sistemas de condução importantes como plantio direto e ILPF e contribuição para melhorar a gestão dos recursos hídricos.

Importante entender que a história da irrigação se confunde com a do desenvolvimento e prosperidade econômica dos povos, em que as principais civilizações antigas tiveram sua origem em regiões áridas, onde a produção só é possível graças à irrigação, demonstrando que a irrigação sempre foi um fator de prosperidade e segurança. No Brasil, a irrigação tem uma história mais recente e precisa ser conhecida., é possível ter uma ideia da evolução da agricultura irrigada no país e, como as tecnologias foram fundamentais para o desenvolvimento e o alcance dos níveis atuais. Rodriguez (2022) faz uma descrição da trajetória da irrigação e o desenvolvimento regional, detalhando os antecedentes e a evolução da irrigação no Brasil, destacando a atuação da iniciativa privada, a irrigação no Sul do país, no Oeste da Bahia, no norte de Minas, no Vale do São Francisco e outras regiões, fechando com o tema cerrado e sua ocupação, que foi fundamental para o avanço da agricultura irrigada no Brasil.

Neste sentido a evolução da agricultura irrigada brasileira permitiu avançar do total de 1,5 milhões de hectares em meados de 1980 até os 9,2 milhões em hectares em 2022. Tão importante quanto multiplicar por seis a área irrigada foi a evolução de uso de sistemas com maior eficiência no uso de água, energia, mão de obra e operacionalidade de maneira geral. Sistemas pressurizados de irrigação por aspersão do tipo pivô convencional e localizada por gotejamento e microaspersão ocupavam 10% do total no passado, hoje evoluíram para mais de 80% do total implantado nos últimos 10 anos.

Diferentemente da situação atual, o crescimento do passado que ampliou a área irrigada brasileira se deu em um cenário de pouca disponibilidade técnica, operacional, industrial e de recursos financeiros. Em 1986, quando foi lançamento os planos nacionais (PRONI) e do nordeste (PROINE), cada um com a proposta de irrigar um milhão de hectares (Rodriguez, 2022), a análise crítica do setor era da impossibilidade de atingir a meta ambiciosa em apenas cinco anos, se o país apresentava tantas limitações, associadas aos elevados custos dos sistemas de irrigação, falta de tecnologia disponível, qualificação técnica do setor, com poucos especialistas no setor. Se, por um lado, todas estas dificuldades foram empecilho para um desenvolvimento mais rápido da agricultura irrigada brasileira, por outro, foram motivos de planejamentos que permitiram que fossem pouco a pouco superadas, implicando em um grande ganho de qualificação dos setores de conhecimento, serviços e produtos relacionados à irrigação e à agricultura irrigada.

Hoje a situação do Brasil é totalmente diferente de 40 anos atrás. Ampliamos nossa capacidade de implantar de forma sustentável novas áreas irrigadas, multiplicaram-se os grandes projetos em diversas regiões, e a eficiência do sistema de produção irrigada tornou-se rotina no agronegócio brasileiro. A partir de 1990, ampliamos nossa capacidade industrial e de importação nas áreas dos sistemas de irrigação convencionais, mecanizados e localizados. A área comercial e de serviços vem a cada dia se profissionalizando, relacionado ao planejamento, implantação e operação de áreas irrigadas nas mais diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. Por fim, evoluímos muito no conhecimento e formação técnica dos profissionais de nível superior, técnico e operacional.

É importante lembrar que todo esse desenvolvimento da agricultura irrigada, nos últimos 25 anos, se deu dentro da nova política nacional de recursos hídricos, criada com a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, uma das mais modernas do mundo e condizente com o novo status da água, que traz, em resumo: “A água é um bem de domínio público, um recurso natural limitado e dotado de valor econômico, sendo seu

uso prioritário, em condições de escassez, para consumo humano e dessedentação de animais” (Brasil, 1997).

Um questionamento que necessitamos fazer com vistas à expansão da agricultura irrigada brasileira nas próximas décadas: se, nos últimos 30-35 anos, com sérias limitações conseguimos ampliar nossa área irrigada em cerca de seis vezes, incorporando de mais de oito milhões de hectares, quanto podemos planejar para o futuro? O que é necessário entender e promover para ampliar o crescimento de áreas irrigadas nos próximos 30 anos e atingir o crescimento da produção de alimentos, fibras e bioenergia?

A resposta para tudo isso passa por três vertentes, a serem trabalhadas, ou seja, (i) nossa capacidade de dialogar com a sociedade sobre a importância da nova agricultura irrigada para o aumento da produção agrícola no Brasil e no mundo e da sua condição atual de sustentabilidade hídrica; (ii) que o poder público crie programas de incentivo e que proporcionem melhorias na infraestrutura (gestão hídrica, energia e logística) e linhas de financiamento e, não menos importante, (iii) que todos os envolvidos no sistema de produção irrigada (sejam produtores, funcionários, empresários, industriais, técnicos, professores ou pesquisadores), tenham consciência e continuem a criar condições para uma agricultura irrigada sustentável, com uso eficiente da água, energia e outros insumos.

Por outro lado, a intensificação da produção (maior produção por unidade de área) que a tecnologia da irrigação possibilita, vem possibilitando a integração de dois importantes elementos, ou seja, (iv) possibilidade de mitigação do efeito estufa pela maior captura do CO₂ quando comparada a culturas em condições não irrigadas (sequeiro e pastagem) e (v) preservação de áreas nativas pela menor necessidade de expansão da fronteira agrícola para aumentar a produção agropecuária brasileira e assim atender a demanda crescente da produção de alimentos.

Neste desenvolvimento da agricultura irrigada fica claro a adoção de processos de manejo e gestão da irrigação tecnificados, que possibilitem o uso eficiente da água, energia, mão de obra e outros insumos, sem prejuízos à produtividade agrícola. Nesse sentido é importante avaliar e discutir estratégias de sucesso na área de manejo da irrigação, que tem o foco nos sistemas de decisão da irrigação no dia a dia e, da gestão da irrigação, onde o foco é ampliado para trabalhar a irrigação dentro do contexto do sistema de produção na agricultura irrigada.

Importante também ter em conta o uso da irrigação para potencializar outros sistemas de produção, destaque para os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tão importantes para agricultura sustentável. Neste sistema de produção, a irrigação realizada de forma efetiva pode trazer grandes ganhos a este sistema de produção tão importante para sustentabilidade.

Auxiliando em todo processo de controle e assim da maior eficiência nos sistemas de produção irrigados, é importante ter em conta, que estamos vivendo um período de grande desenvolvimento tecnológico, onde novas tecnologias são disponibilizadas de forma cada vez mais rápida, simples e com custos acessíveis, como é o caso da automação e sensoriamento remoto. A possibilidade de controle à distância dos sistemas de irrigação e o uso de imagens de satélites estão revolucionando as estratégias de manejo e gestão da irrigação em nível de campo e, a ampliação da utilização dessas novas tecnologias é fundamental para estabilidade do rendimento da cultura do milho e demais.

Assim, em inovação logo pensamos em tecnologia, em sistemas complexos e de difícil aplicação em condições normais de campo. Tal percepção tem sido a cada dia abandonada pela capacidade de desenvolvimento atual, onde as inovações tecnológicas e de sistemas apresentam complexidade no processo de desenvolvimento e instalação por um lado, mas por outro de fácil uso no dia a dia.

Nesta análise de inovações que apresentam complexidade no processo de desenvolvimento e instalação por um lado, mas por outro de fácil uso no dia a dia pode ser comprovada na ampla e completa tecnologia associada aos sistemas de irrigação atuais, onde sistemas do tipo pivô central, gotejamento e gotejamento subsuperficial apresentam a cada dia mais inovações, que tem início no desenvolvimento e fabricação do sistema e segue com um processo de comercialização amplo, moderno e eficiente, projetos de alto nível, instalação completa de sistemas com emissores, controladores e automação em geral, sistema de captação, adutora, reservatórios, canais e outras obras civis de apoio e, sua operação é simples, objetiva e de fácil entendimento.

A tecnologia, ao longo da história, assumiu papel fundamental para o avanço da agricultura irrigada e está ligada a sistemas de irrigação modernos, que são muito eficientes na aplicação de água, no uso de energia e da mão de obra, utilizando níveis cada vez mais adequados de automação e controles. Associado a esse desenvolvimento, os sistemas de manejo da irrigação evoluíram, com visão holística envolvendo as tecnologias integradas e uma prestação de serviço de alto nível.

Das inovações importantes para o desenvolvimento do Cerrado, duas em especiais merecem citação e estão relacionadas a maior concentração de carbono no solo e áreas irrigadas, e em segundo lugar os estudos integrados de recursos hídricos, que possibilitam análises de gestão territorial em base a disponibilidade hídrica e seu potencial de utilização para gerar desenvolvimento, sem esquecer as demandas de todos os usuários.

A disponibilidade e acesso aos recursos hídricos para a implantação de sistemas irrigados que possibilitam a agricultura irrigada tem sido uma grande preocupação. Neste sentido uma grande inovação nesta análise tem sido a implantação de projetos e estudos integrados, onde todas as variáveis envolvidas são consideradas e se interagem, para permitir uma visão completa que permite o desenvolvimento da produção irrigada em condições sustentáveis.

Denominados de “Sistema integrado de inteligência territorial para gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada”, foi inicialmente desenvolvido no período de 2017 a 2021 na região Oeste da Bahia, em uma parceria entre a Associação de Irrigantes (AIBA), universidades (Universidades Federal de Viçosa e do Rio de Janeiro), poder público por meio das secretarias de governo e órgão gestor (INEMA, SEMA, SEAGRI, SIHS), parceiro internacional (DWHI - Universidade de Nebraska Lincoln), parceria locais (universidades e faculdades locais).

Os resultados obtidos vêm permitindo um grande avanço no conhecimento do tema, que tem sido medido pelo grande número de publicações científicas, pela ampla divulgação e debate de técnico e científico, como consequência a região do Oeste da Bahia é hoje uma das regiões do agronegócio brasileiro com mais informações integradas dos recursos hídricos em todo Brasil. Contribuíram para isso de forma significativa as informações já existentes e mais as que foram adquiridas e integradas no amplo estudo realizado (Mantovani *et al.*, 2021).

Este estudo se tornou um modelo de desenvolvimento para subsidiar a gestão estratégica e sustentável dos recursos hídricos em outras regiões e o estado do Mato Grosso, que detém o maior potencial de crescimento da agricultura irrigada no Brasil, com 20% e 30%, respectivamente do potencial total e do efetivo a curto e médio prazo, é o primeiro a planejar este estudo para todo estado.

Outro fato importante e que permite entender a mudança de conceito dos produtores e, que tais estudos têm sido propostos, incentivados e, em parte, financiados pelos próprios produtores através das suas associações, como AIBA (Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia), APROFIR (Associação dos Produtores de Feijão, Pulses, Grãos Especiais e Irrigantes de Mato Grosso) e outras

Um fator importante do ponto de vista ambiental relacionado às mudanças climáticas é a possibilidade da intensificação proporcionada pela agricultura irrigada no cerrado, além dos benefícios já citados do ponto de vista econômico e social, seria a capacidade de ampliar a quantidade de carbono retida no solo, juntando a segurança alimentar com a segurança ambiental.

É reconhecido que a prática da irrigação tem um caráter de intensificação da produção por unidade de área, possibilitando uma maior produção de matéria orgânica de raízes, que é incorporada diretamente ao solo, além da parte aérea que pode ser incorporada em parte de forma indireta. Porém, os efeitos da irrigação e das diferentes práticas de manejo sobre o balanço de carbono de culturas agrícolas ainda são pouco compreendidas. Não há dúvida que a agricultura irrigada é uma tecnologia de adaptação às mudanças climáticas, devido à redução do risco climático das culturas, mas também seria uma prática de mitigação do efeito estufa?

Recentemente, durante a revisão do Plano ABC+ do MAPA (Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável 2020-2030, publicado em 2023), a visão estratégica para este novo ciclo exigiu uma análise mais ampla, para que a irrigação fizesse parte do plano, não apenas como atividade de adaptação às mudanças do clima (MAPA, 2023). Neste sentido era necessário comprovar sua capacidade de mitigação das mudanças climáticas, através da estimativa do balanço de carbono de culturas irrigadas.

A análise da mitigação através da expansão da agricultura irrigada foi feita em relação a condições não irrigadas (sequeiro). Os trabalhos desenvolvidos por Dionizio *et al.* (2020) e Campos *et al.* (2020) no cerrado da região Oeste da Bahia, permitiram calcular comparativamente a retenção de carbono no solo em diferentes condições de manejo.

Os trabalhos citados foram desenvolvidos com as mais rigorosas tecnologias de análise científica, no trabalho desenvolvido por Dionizio *et al.* (2020) foi feita uma grande amostragem de carbono de solo no campo na camada de 0 a 100 cm envolvendo as diversas classes de uso do solo ao longo do tempo. Por outro lado, no trabalho desenvolvido por Campos *et al.* (2020), utilizando uma grande base de dados de carbono orgânico do solo, obtido de 5469 amostras de solo da camada de 0 a 20 cm de nove fazendas no período de 2010 e 2018, apresentou valores da taxa anual de variação do carbono no solo.

Considerando uma proposta de crescimento da área irrigada brasileira a uma taxa de 300 mil ha por ano e um total de 3 milhões de ha implantados em 10 anos, sob área de agricultura de sequeiro, foi possível estimar o ganho relativo da implantação. Como

o crescimento é anual e o valor de 3 milhões de ha vai ser implementado ano a ano, o valor final para faixa de 0 a 30 cm foi de 50,8 milhões de Mg CO₂ ha⁻¹ ou 50,8 Tg CO₂ ha⁻¹ (Costa; Mantovani, 2023).

Estes valores de captação total de CO₂ calculados utilizando os trabalhos desenvolvidos por Dionizio *et al.* (2020) e Campos *et al.* (2020) na região Oeste da Bahia e a proposta de mitigação foram utilizadas para inclusão da Agricultura Irrigada (Sistemas Irrigados) no Programa ABC+ do MAPA.

14.5 Considerações finais

Assim sem dúvida a agricultura irrigada por sua capacidade de intensificação da produção, em especial no bioma Cerrado, apresenta uma importante estratégia para segurança alimentar, evitando-se necessidade de expansão da fronteira agrícola além do adequado e assim a manutenção de áreas com vegetação nativa. Além disso, a intensificação e maior produtividade proporciona aumento na retenção de carbono no solo, em níveis capazes de auxílio significativo na mitigação do efeito estufa. Para esta comprovação é necessário o desenvolvimento de novos trabalhos que possam caracterizar de forma adequada a retenção do carbono no solo em áreas irrigadas nas diferentes condições edafoclimáticas do Brasil.

A expansão da agricultura irrigada brasileira tem sido em base a sistema de alta eficiência de irrigação, envolvendo uso de equipamentos de última geração como pivô central, irrigação localizada e aspersão convencional, projetos adequados do ponto de vista de otimização de água, energia e mão de obra e uso de emissores de alta performance.

O uso de sistemas de manejo da irrigação com alta tecnologia, utilizando sistemas integrados na web com uso de estações meteorológicas automáticas, sensores de solos e sensoriamento remoto são fundamentais para a busca da sustentabilidade da agricultura irrigada.

A outorga de água é um processo normal para agricultura irrigada e a sua solicitação é questão básica e imprescindível para o início do processo de planejamento e implantação da área irrigada. O Brasil possui uma das leis de recursos hídricos entre as mais completas do mundo (Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997) e utiliza uma parte muito pequena da sua disponibilidade de recursos hídricos superficiais e subterrânea. Nas regiões de grande concentração de áreas irrigadas, iniciativas de estudos integrados de recursos hídricos, outorga sazonal e/ou coletiva tem sido avaliada, além da possibilidade de ampliação da disponibilidade hídrica através de processos de conservação de água no solo e construção e uso de pequenos reservatórios, entre outras.

Referências

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA. 130p. 2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos**. Brasília: ANA. Boletim nº 4. 2023.

ALTHOFF D.; RODRIGUES L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.1, p. 56–61, 2019.

-
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 545 p. 2019.
- BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília, DF: Embrapa, v. 1, 308 p. 2020. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212381/1/LV-DINAMICAAGRICOLA-CERRADO-2020>.
- BRASIL. Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 23 mar. 2024.
- CAMPOS, R.; PIRES, G. F.; COSTA, M. H. Soil carbon sequestration in rainfed and irrigated production systems in a new Brazilian agricultural frontier. **Agriculture**, 10, 156; 2020. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050156>.
- COSTA, M. H.; MANTOVANI, E. C. Análise do impacto da agricultura irrigada na captura de CO₂. **Aiba Rural**. 3º trimestre, 2023.
- CSEI/ABIMAQ - Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação/ Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos. **Atualização da área irrigada no Brasil em 2021**. 2022. Disponível em: <https://informaq.abimaq.org.br/?s=CSEI>. Acesso em: 03 out. 2022.
- CSEI/ABIMAQ - Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação/ Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos. **Atualização da área irrigada no Brasil em 2022**. 2023. Disponível em: <https://informaq.abimaq.org.br/?s=CSEI>. Acesso em: 11 out. 2023.
- DIONIZIO, E. A.; PIMENTA, F. M.; LIMA, L. B.; COSTA, M. H. Carbon stocks and dynamics of different land uses on the Cerrado agricultural frontier. **PLoS ONE** 15(11), e0241637. 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241637>.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **How to feed the world in 2050. High level expert forum**. Convened at FAO Headquarters in Rome on 12-13, 2009.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Municipal. 2019**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 11 out. 2023.
- KLINK, C. A. Policy intervention in the Cerrado savannas of Brazil: Changes in the land use and effects on conservation. *In*: CONSORTE-MCCREA, A.; SANTOS, E. F., **Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives**, p. 293–308, 2014.
- MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. R. **Irrigação do Cafeeiro**: informações técnicas e coletânea de trabalhos. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Agrícola, 261 p, 2003.
- MANTOVANI, E. C.; COSTA, M. H.; MARQUES, E. A. G. *et al.* **Sistema integrado de inteligência territorial para gestão dos recursos hídricos superficiais e**

subterrâneos e desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Oeste da Bahia. Relatório Técnico Final. Viçosa, outubro de 2021. Disponível em: <https://aiba.org.br/outras-publicacoes/>. Acesso em: 18 fev. 2024.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Tecnologias do ABC+.** Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/abc/tecnologias-do-abc-spsabc>. Acesso em: 31 ago. 2023.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v. 38, n. Supplement C, p. 146–155, 2013.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável.** Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017.

RODRIGUEZ, F. **Breve contribuição para a história da agricultura irrigada no Brasil.** Editora Suprema, 196 p. 2022.

TERRACLASS. **Mapeamento do uso e cobertura da terra do cerrado.** Projeto Terraclass Cerrado 2013. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Brasília-DF, 2015. Disponível em: https://www.dpi.inpe.br/tccerrado/Metodologia_TCCerrado_2013.pdf. Acesso em: 11 out. 2023.

VAN DIJK, M.; MORLEY, T.; RAU, M. L. *et al.* A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. **Nature Food**, 2(7), 494-501. 2021. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>.

CAPÍTULO 15

ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS NO CERRADO E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Alessandra Terezinha Chaves Cotrim Reis

Resumo

Entre os fatores imprescindíveis para condução das atividades rurais no Brasil a gestão ambiental deve ser priorizada para equalização dos usos múltiplos dos recursos naturais e sua conservação para diferentes gerações. Desta maneira, a utilização racional dos recursos ambientais tem como ferramenta a implementação do arcabouço legal que é imprescindível para a segurança de todos os usuários. A legislação ambiental brasileira é complexa, robusta e rígida, e tem evoluído à medida que se amplia a inquietação nacional e internacional pelo equilíbrio ambiental e a utilização sustentável dos recursos naturais. Entre diferentes e amplos aspectos abordados na legislação atual, as regras e restrições que norteiam o uso e ocupação do solo e da água, conservação da biodiversidade, reposição florestal, restauração da vegetação nativa e dos serviços ecossistêmicos, gestão de resíduos e dos recursos naturais, em conjunto são essenciais para a manutenção da sustentabilidade em áreas rurais no Brasil, em especial no Cerrado que se encontra em franca expansão para produção de diferentes *commodities*. Assim, a condução de estratégias que tragam não somente o cumprimento legal, mas também a adoção de boas práticas, inovação, tecnologia, transparência no uso de ocupação do solo são essenciais para manter a segurança das atividades conduzidas em campo, visando atender a crescente demanda pela produção de alimentos associada ao aumento na produção, produtividade e competitividade no mercado. Entre os instrumentos importantes trazidos pela legislação brasileira e essencial para o ordenamento territorial em áreas rurais no Brasil, a Lei nº12.651, de 25 de maio de 2012, trouxe entre outros instrumentos o Cadastro Ambiental Rural (CAR) que é uma importante ferramenta de gestão para o uso e ocupação do solo fundamental para nortear a ocupação de áreas consolidadas, preservação, conservação e restauração de vegetação nativa em diferentes bacias hidrográficas, essencial para a manutenção da produção a longo prazo e a sustentabilidade *lato sensu*.

15.1 Introdução

A utilização racional dos recursos ambientais tem como ferramenta prioritária a implementação do arcabouço legal que é imprescindível para a segurança de todos os usuários; e a gestão ambiental vem como uma ferramenta prioritária para equalização dos usos múltiplos dos recursos naturais, da sua conservação e dos impactos para diferentes gerações.

O Cerrado tem despertado o interesse não somente pelos números expressivos de produção e produtividade nas atividades agrícolas, mas principalmente pela necessidade de equalizar a preservação da sua biodiversidade e de todos os serviços ecossistêmicos e ambientais associados.

Neste contexto, a performance da agricultura brasileira tem refletido o importante desenvolvimento do setor no Cerrado ilustrando a importância desta região para a economia do país e para a segurança alimentar global, considerando o crescente aumento populacional e demanda por alimentos.

Importantes movimentos e iniciativas para ampliação da conservação do Cerrado tem se mostrado factíveis, também em curto prazo, como o fomento a adoção em larga escala de boas práticas de uso e manejo do solo e da água, manutenção de áreas com excedentes de vegetação nativa, criação e implementação de Unidades de Conservação, inclusive de Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), criação das Cotas de Reserva Ambiental (CRA), obrigatoriedade da reposição florestal e restauração de áreas com vegetação nativa, as quais perpassam, entre outros aspectos, de maneira direta ou indireta com a implementação do Código Florestal Brasileiro, permitindo lastrear a regularidade do empreendimento rural, e simultaneamente criar e implementar mecanismos de valorização de ativos ambientais, essências para a manutenção da biodiversidade, dos recursos hídricos, regulação do clima, estabilidade dos solos em diferentes regiões, e de maneira paralela é imprescindível para cumprir importantes metas e acordos nacional e internacional, visando ampliar a sustentabilidade conduzida em áreas rurais.

15.2 Contextualização

15.2.1 A Legislação brasileira que rege as atividades rurais

O arcabouço legal extenso e rígido tem lastreado as ações nos empreendimentos rurais em diferentes regiões do Brasil, não somente no que se refere ao seu cumprimento mais principalmente com a adoção de boas práticas agrossilvipastoris, as quais tem promovido em curto, médio e longo prazo a sustentabilidade *lato sensu*, além de criar normas, trazer restrições e regulamentar diversos aspectos relacionados ao uso e ocupação do solo e da água, conservação da vegetação nativa e dos serviços ecossistêmicos, gestão de resíduos e dos recursos naturais em diferentes regiões no Brasil.

Os empreendimentos e/ou propriedades instaladas e/ou em operação em áreas rurais no país, são passíveis de obtenção de atos autorizativos associados ao uso e ocupação do solo, de recursos hídricos, de resíduos sólidos e efluentes norteados pela legislação ambiental Estadual, Federal e/ou municipal conforme repartição de competência trazidas na Lei Complementar nº 140 de 8 de dezembro de 2011, que fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do *caput* e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981.

Seguindo a perspectiva de normativas sobre o uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos em áreas rurais, o marco regulatório brasileiro é eclético e apresenta diversas vertentes, o que muitas vezes trazem dificuldade de interpretações técnicas e jurídicas. Entre as normas nacional que também rege outras normativas, essenciais para a condução de diferentes atividades em áreas rurais, incluindo a agricultura, pecuária e silvicultura, seguem em destaque:

-
- i. *Lei Federal nº 6.225 de 14 de julho de 1975, que dispõe sobre discriminação, pelo Ministério da Agricultura, de regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão e dá outras providências;*
 - ii. *Lei Federal nº 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõe entre outros fatores sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, por meio da criação de sistemas e entidades para articular e dar suporte institucional e técnico para a gestão ambiental no país, tornando mais efetiva a atuação do Estado;*
 - iii. *Lei Federal nº 8.174, de 30 de janeiro de 1991 que dispõe sobre a Política Agrícola Brasileira;*
 - iv. *Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (Política Nacional dos Recursos Hídricos) que estabeleceu instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH);*
 - v. *Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, também conhecida como a Lei de Crimes Ambientais, e do Decreto no 6.514, de 22 de julho de 2008 que a regulamenta;*
 - vi. *Lei Federal nº 9.985 de 18 de julho de 2000 que regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza entre outros aspectos;*
 - vii. *Lei Federal nº 11.284, de 2 de março de 2006 que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável, entre outros aspectos;*
 - viii. *Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006 que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma Mata Atlântica e dá outras providências;*
 - ix. *Lei Federal nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências;*
 - x. *Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal Brasileiro) que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, implementação do Cadastro Ambiental Rural (CAR), entre outras ferramentas importantes para o ordenamento do imóvel rural, hoje essencial para demonstrar as áreas consolidadas, preservadas e conservadas no empreendimento rural e criação das Cotas de Reserva Ambientais (CRA);*
 - xi. *Lei Federal nº 12.787, de 11 de janeiro de 2013 (Política Nacional de Irrigação), trouxe incentivos importantes para agricultura brasileira, com foco na produção irrigada, condição que fomenta o aumento da produção agrícola no país;*
 - xii. *Lei Federal nº 13.123, de 20 de maio de 2015 que regulamenta entre outros aspectos o acesso ao patrimônio genético, sobre a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado e sobre a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade;*
 - xiii. *Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2020 que Instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências;*
 - xiv. *Lei Federal nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021, que Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nº 8.212, de 24 de julho de 1991, nº 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política;*
 - xv. *Lei Federal nº 14.590, de 24 de maio de 2023, que muda o Marco Regulatório da Gestão de Florestas Públicas por meio de concessões, altera a Lei Federal nº 11.284, de 2 de março de 2006, permitindo a exploração de outras atividades*

não madeireiras e o aproveitamento e a comercialização de créditos de carbono;

- xvi. *Lei Federal nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem, a rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e das embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, de produtos de controle ambiental, de seus produtos técnicos e afins.*

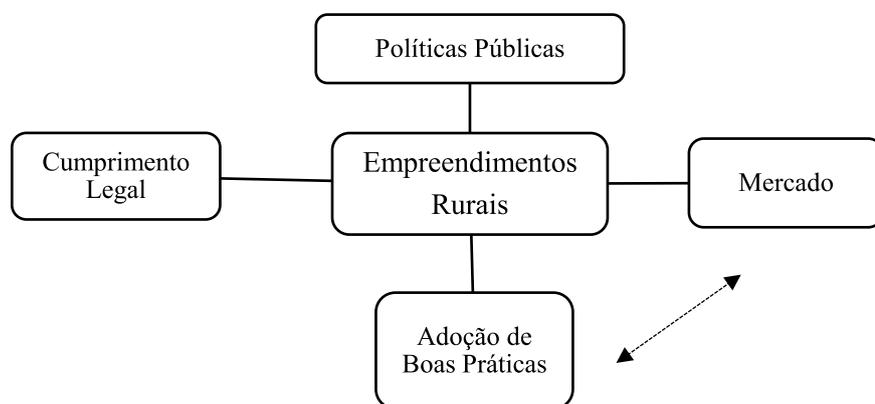
O conjunto de legislação nacional, traz entre outros assuntos, informações e normas, que juntas tem corroborado incitativas e ações de inovação e tecnologia, conduzidas nos empreendimentos rurais em diferentes regiões.

Sobre diferentes aspectos, incluindo produção, produtividade e sustentabilidade o Brasil torna-se o grande diferencial para o mundo, não somente pelos números registrados em campo, mas também por possuir uma legislação rígida e robusta, quando comparada a outros países (Reis, 2022). Esta condição, ao longo dos anos, tem colocado o país em destaque na produção mundial, trazendo em evidência para as ações no campo, no que se refere principalmente a sustentabilidade social, econômica e ambiental, tendo estas como ferramentas prioritárias e essenciais para a manutenção e expansão da atividade em áreas rurais, associando a conservação e a utilização racional dos recursos naturais em diferentes regiões.

Seguindo nesta perspectiva, o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012, trouxe novas diretrizes sobre o ordenamento territorial e ao direito de propriedade e, em paralelo, avanços relacionados à regularização ambiental dos empreendimentos rurais e ao desenvolvimento sustentável no País. Desde a sua publicação o Código Florestal é o principal regramento brasileiro em que se destina à proteção, conservação e/ou recuperação da vegetação nativa encontrada nos imóveis rurais, uma vez que traz regras importantes sobre o uso e ocupação do solo, incluindo para áreas consolidadas até 22 de julho de 2008. Neste contexto, a partir de 2012, ocorreu um avanço para a descentralização da gestão ambiental no Brasil, tendo como ferramenta principal a criação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) associado ao Programa de Regularização Ambiental (PRA), além da criação do primeiro instrumento econômico de incentivo a conservação florestal no Brasil que é a Cota de Reserva Ambiental (CRA), instituída pelo art. 44 e regulamentado pelo Decreto Federal nº 9.640 de 27 de dezembro de 2018; essa publicação em junto com outros atos normativos a exemplo da Lei Federal nº 14.119 de 13 de janeiro de 2021 que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e da Lei Federal nº 14.590, de 24 de maio de 2023, que muda o Marco Regulatório da Gestão de Florestas Públicas por meio de concessões, altera a Lei Federal nº 11.284, de 2 de março de 2006, permitindo a exploração de outras atividades não madeireiras e o aproveitamento e a comercialização de créditos de carbono, contribuem para ampliar a visão sobre o uso e ocupação de terras no Brasil associadas a criação de estratégias de conservação em diferentes regiões.

A Figura 1, traz um resumo simples que norteia as atividades de produção de diferentes *commodities* em áreas rurais no Brasil, onde a implementação de políticas públicas, norteada em legislação, direciona o uso e ocupação de áreas no Brasil, que por sua vez atenderá uma expectativa do Mercado, que envolve não somente o processo produtivo, mas principalmente estratégias de armazenamento, comercialização, escoamento de produção, rastreabilidade e segurança nos processos.

Figura 1 - Condução de atividades de produção de diferentes *commodities* em áreas rurais no Brasil



Fonte: A Autora (2024).

15.3 Importância da Implementação do Código Florestal e o Cerrado

A legislação vigente, traz importantes mecanismos e estratégias voltadas ao monitoramento e regramento sobre o uso e ocupação de solo em áreas rurais do Brasil.

O Código Florestal (Lei Federal nº 12.651/2012) é a principal norma para o uso da terra e a conservação de florestas e outras formas de vegetação em áreas privadas. Esta norma é fundamental para o ordenamento das atividades do imóvel rural no Brasil, e traz instrumentos importantes para demonstrar as áreas consolidadas, abertas, preservadas e conservadas no empreendimento rural e sua aplicação se insere no arcabouço jurídico e instrumentos legais que norteiam e disciplinam o uso e ocupação do solo, a conservação e a preservação dos recursos naturais no Brasil. Entre os instrumentos trazidos por esta legislação, encontra-se a obrigatoriedade dos produtores rurais conservar, restaurar ou compensar a vegetação natural em sua propriedade rural em percentual de proteção que varia entre 80% e 20%; além da obrigatoriedade de proteger APP's (Figura 2), a exemplo de matas ciliares, nascentes, veredas, topos de morros, entre outros descritas no Art. 4.

Figura 2 - Área de Preservação Permanente (APP).



Fonte: Marcelo Braz de Oliveira Braga (2024).

Entre os instrumentos trazidos pelo Código Florestal o Cadastro Ambiental Rural (CAR) nos mostra de maneira clara, oportunidades associadas ao monitoramento e fiscalização sobre o uso e ocupação dos solos em áreas rurais, que pode contribuir com a redução drástica do desmatamento, acelerar a restauração em diferentes áreas, garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade, além de ampliar a segurança jurídica e ambiental não somente para os proprietários das terras, mas também para investidores, consumidores, indústrias e outros atores importantes na cadeia produtiva. Pois atrelados ao CAR tem-se o Programa de Regularização Ambiental (PRA) o qual oferece oportunidades específicas de regularização para imóveis rurais com passivos ambientais em RL, APP e de áreas de uso restrito abertas até 22 de julho de 2008 através da adesão ao Termo de Compromisso junto ao órgão de regulação estadual.

Assim, a implementação do CAR e PRA, trarão importantes benefícios não somente para a gestão ambiental rural, mas também, para as pautas sociais e econômicas associadas ao agronegócio, onde a atividade agropecuária tem sido o grande destaque. De acordo com os dados do Cepea/CNA (2024) em 2023 a contribuição do agronegócio para o PIB nacional se manteve significativa, correspondendo a 23,8% do PIB do país.

Seguindo nesta perspectiva, a implementação dos diferentes instrumentos trazidos pela legislação florestal pode não somente trazer segurança para todos os usuários e beneficiários diretos e indiretos, mas também de acordo com Giudice (2020) pode trazer oportunidades associadas a conservação de mais de 162 milhões de hectares de vegetação nativa no Brasil, sequestrando cerca de 100 GtCO₂; e em paralelo contribuir para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, que é decisivo para que o país possa cumprir os compromissos assumidos no âmbito do Acordo de Paris (compromisso mundial sobre as alterações climáticas e prevê metas para a redução da emissão de gases do efeito estufa - GEE) e discutidos sistematicamente na Convenção do Clima das Nações Unidas (ONU) entre os países-membros da Conferência das Partes (COP). Contudo, de acordo com o balanço global Global Stocktake (GST) apresentado na COP 28 em 2023, é importante ressaltar que, para atingir as metas estabelecidas é necessário implementar ações mitigadoras claras, efetivas e imediatas, as quais estão diretamente ligadas também ao uso e ocupação em diferentes regiões do mundo. Cada país signatário estabeleceu metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE), chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). De acordo com MMA (2023) a NDC brasileira, atualizada em 2023, estabelece que o Brasil deve reduzir as suas emissões em 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação às emissões de 2005; além disso, em 2023, o Brasil reiterou seu compromisso de alcançar emissões líquidas neutras até 2050, ou seja, tudo que o país emitir deverá ser compensado com fontes de captura de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomas ou outras tecnologias. Neste contexto, é importante destacar que a maior parte das reduções nas emissões deverá resultar da contenção do desmatamento, das ações de restauração, reposição florestal e adoção de boas práticas, principalmente de manejo do solo, cada vez mais sustentáveis e de baixa emissão de carbono que são medidas necessárias para o cumprimento efetivo da legislação, e dos compromissos e metas assumidos por diferentes países, incluindo o Brasil.

Assim, por meio do CAR que é a porta de entrada para a condução de diferentes processos em áreas rurais do Brasil, as instituições de regulação, podem adotar estratégias efetivas de monitoramento contínuo, ordenamento, planejamento ambiental e econômico, regularização ambiental, combate ao desmatamento, mas principalmente para trazer segurança sobre o uso do solo e ordenamento territorial uma vez que é obrigatória a adesão e inscrição no Cadastro das informações referente as propriedades,

a exemplo de: (i) áreas consolidadas; (ii) áreas produtivas; (iii) áreas destinadas a Reserva Legal; (iv) áreas de preservação permanente (APP); (v) áreas com excedentes de vegetação nativas, entre outros. Estas informações em conjunto trazem oportunidades para criação de políticas públicas destinadas a valorização de Ativos Ambientais e Carbono (do solo e de vegetação nativa), que tem o seu lastro em Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), implementação das Cotas de Reserva Ambiental (CRA), contudo muito se tem a avançar nas análises do Cadastros em diferentes regiões do Brasil.

Por meio do CAR, o país dispõe de uma ferramenta *online* de acesso público, que traz uma análise sobre o uso e ocupação de terras no Brasil. Essas informações em conjunto trazem um panorama sobre as Áreas de Preservação Permanente (APP), Áreas de Reserva Legal, excedentes de vegetação nativa e áreas consolidadas encontradas nas propriedades rurais. Embora a legislação federal tenha delineado as diretrizes para regularização ambiental dos imóveis rurais no país em diferentes bacias hidrográficas e biomas, compete aos Estados elaborar normas e procedimentos específicos sobre a matéria, o que tem provocado diferentes avanços e determinando diferentes estágios de implementação, mesmo após 12 anos da sua publicação, em 2012.

É importante destacar que o processo de regularização ambiental dos imóveis rurais encontra-se associado a adesão ao CAR, e que este instrumento é essencial para adesão ao Programa de Regularização Ambiental (PRA), em imóveis com passivos ambientais. Seguindo o lastro legal, o Decreto Federal nº 8.235 de 05 de maio de 2014 estabelece normas gerais complementares aos Programas de Regularização Ambiental dos Estados e do Distrito Federal, de que trata o Decreto nº 7.830 de 17 de outubro de 2012 que instituiu o Programa Mais Ambiente Brasil. A adesão pelo produtor rural ao PRA recebe especial atenção, uma vez que é imprescindível para a regularização de áreas com passivos ambientais relacionados a Áreas de Preservação Permanente (APP's) e de Reserva Legal (RL) e será a base para a implementação dos incentivos econômicos e financeiros dos serviços ambientais do Brasil, em diferentes imóveis rurais que hoje encontram-se com passivos ambientais. Além disso o CAR é primordial para o fomento e implementação de ações efetivas de preservação e conservação de grandes remanescentes de vegetação nativa e ativos ambientais encontrados nos imóveis rurais. Portanto é fundamental que os Estados avancem não somente na regulamentação do PRA, mas principalmente na análise efetiva do CRA, para que aconteça os avanços práticos em campo e no mercado.

Conforme previsto no Código Florestal para os imóveis rurais localizados no Cerrado além da necessidade de preservação das Áreas de Preservação Permanente (APP's) previstas no Art. 4 e Art. 5, deverão ser reservadas as áreas de Reserva Legal delimitada conforme o Art. 12, cujo percentual pode variar de 35% (trinta e cinco por cento) em áreas localizadas na Amazônia Legal e 20% (vinte por cento) para imóveis localizados nas demais regiões do país, com a função de assegurar o uso econômico sustentável dos recursos naturais, auxiliar a conservação, a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como fornecer abrigo e a proteção da fauna silvestre e da flora nativa, conforme distribuição na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de Reserva Legal Obrigatória para todos os imóveis rurais nas diferentes regiões do Brasil

DELIMITAÇÃO DO PERCENTUAL DE RESERVA LEGAL (%) DO IMÓVEL	PORCENTAGEM (%) DO IMÓVEL
Imóveis localizados na Amazônia Legal	80% dos imóveis situados em áreas florestais.
	35% da propriedade está situada em áreas de savana tropical.
	20% da propriedade situada em áreas de pastagem.
Imóveis localizados nas demais regiões do país	20% do imóvel.

Fonte: A Autora, 2024, com informações da Lei Federal nº 12.651/2012.

Ponderando os diferentes aspectos e legislação que normatiza o uso e ocupação em áreas rurais no Brasil, destaca-se o Cerrado por possuir uma importância ímpar e estratégica para manutenção da segurança alimentar, da biodiversidade e dos recursos hídricos em razão de suas características econômicas, sociais e ambientais que apresenta, uma vez que abrange uma porção importante do país, cerca de 24% do território brasileiro, e cobre totalmente, ou parcialmente, os estados Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins, Mato Grosso, Piauí, São Paulo, Bahia, Paraná e Rondônia, além do Distrito Federal, conforme dados do IBGE (2004). Considerando a sua localização, o Cerrado tem merecido o olhar especial no que se refere a diferentes aspectos, entre estes, o potencial agrícola, produção, produtividade, recursos hídricos, diversidade, biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Estas condições, também permitiu que a região tenha a atenção especial de instituições de pesquisa, regulação, crédito, inovação e tecnologia, que juntas tem trazido um olhar sistêmico para a região. Portanto, diversos aspectos devem ser pontuados quando se fala de implementação de políticas públicas e estratégias para o Cerrado.

O fomento a implementação de políticas públicas voltadas a ocupação do Cerrado especialmente na região centro-oeste do Brasil, na década de 1980, incentivou e colaborou com a mudança de paradigma na agricultura brasileira; até então o Cerrado era um grande vazio demográfico. Segundo estimativas de Goedert (1989) *apud* Contini *et al.* (2020), cerca de metade dos 207 milhões de hectares, ou seja, cerca de 100 milhões de hectares, seriam de terras potencialmente aráveis. Ainda, de acordo com Contini *et al.* (2020) o clima tropical, com amplitude moderada de temperaturas durante o ano e um regime pluviométrico definido, com um período de chuvas e outro de seca, sinalizava que a agropecuária, com tecnologia, podia ser uma opção viável para impulsionar o desenvolvimento regional, assim o grande desafio era os solos do Cerrado, de baixa fertilidade e de alta acidez. Contudo, a condução de pesquisa, muita inovação e aplicação de tecnologia, transformou a região que, ao longo dos anos, se tornou o maior polo de desenvolvimento agrícola do país.

Neste cenário, o Brasil, é um diferencial de competitividade no mundo, considerando a produção e as altas taxas de produtividades, é considerado um celeiro global essencial para manutenção da segurança alimentar. De acordo com a CONAB (2024), algumas culturas, a exemplo da soja deverá atingir uma produção estimada em 162,4 milhões de toneladas, com um crescimento de 2,8% na área a ser semeada, o que

ainda consolidará o Brasil como o maior produtor mundial da oleaginosa, evidenciando a importância da condução de uma agricultura mais sustentável e de baixa emissão de carbono.

Seguindo uma perspectiva integrada, o Cerrado, que é considerado a Savana brasileira (IBGE, 1992), exercendo um papel estratégico para a conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, uma vez que a sua localização central permite o intercâmbio de espécies com a Floresta Amazônica, a Mata Atlântica e Caatinga, sendo decisivo também para a manutenção da segurança hídrica, energética e regulação climática. Além da riqueza biológica, a vegetação nativa que é composta por diferentes fisionomias, associadas ao manejo e conservação dos solos exerce papel importante na manutenção do regime hídrico, apresentando os aquíferos Guarani, Urucuia e Bambuí, que são os maiores aquíferos de água doce do continente; é o local de origem de grandes bacias hidrográficas brasileiras e do continente sul americano, Amazônica, Prata/Paraguai e São Francisco e exerce um enorme papel na proteção e manutenção de nascentes de oito das doze bacias hidrográficas mais importantes do Brasil: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico-Nordeste-Occidental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico-Leste, Paraná, Paraguai - Prata/Paraguai, portanto essencial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

Estratégias para a ampliação de áreas preservadas, conservadas e/ou de restauração no Brasil, incluindo para o Cerrado o lastro legal está associado principalmente, a: (i) Lei Complementar nº 140/2011, que disciplina as ações de Cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios, incluído a gestão de florestas e formações sucessoras; (ii) Lei nº 12.651/2012 (Código Florestal); (iii) Lei Federal nº 14.590/2023 (Marco Regulatório da Gestão de Florestas Públicas); e (iv) Legislação Florestal Estadual, atendendo as especificidades de cada Estado.

Desde a sua publicação em 2012 o Código Florestal trouxe muitas oportunidades, entre estas: (i) implantação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) maior ferramenta de gestão e monitoramento ambiental, obrigatória para todas as propriedades rurais; (ii) implementação de mecanismos de valorização de áreas preservadas e ambientais por meio da criação de Cota de Reserva Ambiental (CRA), essenciais para preservar excedentes de vegetação nativa; (iii) implementação do Programa de Regularização Ambiental (PRA) para imóveis com passivo ambiental; (iv) Atualização das regras de Reposição Florestal para atividades rurais e industriais, essenciais para manutenção da regularidade ambiental, gestão do empreendimento e ampliação de áreas conservadas; (v) definição de mecanismos para Implementação de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), essenciais para reduzir a pressão na abertura de novas áreas; (vi) ampliação da condução de Programas de Restauração de Áreas; (vii) mitigação de impactos das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e no clima; (viii) implementação do mercado de carbono no Brasil; (ix) criação de melhores oportunidades de financiamento com base em boas práticas de gestão e conservação do solo e da água e na manutenção de ativos ambientais (por exemplo, títulos verdes); e (x) criação de apoio financeiro a ações, programas e projetos de recuperação de áreas degradadas.

Da mesma forma, também apresenta grandes desafios para sua efetiva implementação, em que se segue: (i) análise e validação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) pelas instituições reguladoras considerando a ausência e/ou gestão de sistemas, e também equipes técnicas reduzidas; (ii) implantação e monitoramento do módulo do Programa de Regularização Ambiental (PRA), para imóveis rurais com passivo ambiental, considerando que muitos Estados não possuem sistemas próprios ou a gestão ainda é ineficiente; (iii) regulamentação específica e implementação efetiva das Cotas

de Reserva Ambiental (CRA), para ampliar a regularização ambiental das propriedades rurais e a conservação da vegetação nativa; (iv) implementação do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) para promover a restauração de áreas e melhorar os serviços ambientais e ecossistêmicos; e (v) implementação efetiva do mercado de implementação do Mercado de Carbono.

Os dados e informações a adesão ao CAR, publicados (<http://www.car.gov.br/#/>) demonstram a delimitação das áreas conservadas em diferentes regiões do Brasil, conforme previsão legal em Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reserva Legal, incluindo os excedentes de vegetação nativa, ativos ambientais que podem ser destinadas a Cotas de Reserva Ambiental, a Servidão Ambiental, a Redução de Emissões do Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), a REDD+Juristional, entre outros instrumentos, essenciais para manutenção dos serviços ecossistêmicos e promoção da atividade rural com baixa emissão de carbono, em especial para o Cerrado que aparece como a grande fronteira agrícola no mundo. Desta maneira, a validação dos processos de inscrição do CAR, trará importantes avanços ambientais para condução de políticas de conservação e mitigação de impactos, incluindo oportunidades para o país não somente cumprir a legislação vigente brasileira, mas também acordos importantes sobre o clima.

Além da adequação no que se refere a manutenção da vegetação nativa no imóvel rural, diferentes aspectos voltados à conservação, à gestão territorial, gestão dos recursos hídricos e eficiência no sistema produtivo tem sido busca constante pelos produtores rurais, instituições de regulação e também pela sociedade, que de maneira ampla vêm seguindo o lastro legal não somente do Código Florestal, mas também pela Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e suas regulamentações. Neste contexto, é importante destacar que para um empreendimento rural está em operação em diferentes regiões do Brasil é necessário cumprir requisitos associados não somente a adesão ao CAR e ao PRA em imóveis rurais com passivos ambientais, mas também é necessário, a obtenção de outorga de uso da água para vazão superior a 0,5l/s, autorização de supressão de vegetação (ASV), licenças e outros atos autorizativos, além do cumprimento de condicionantes associadas a gestão de resíduos e efluentes, educação ambiental, monitoramento de uso da água, e adoção de medidas voltadas ao manejo e conservação dos solos e dos recursos hídricos.

Assim, o aumento de produtividade associado à conservação de grandes remanescentes de vegetação nativa conforme previsão legal, deve-se principalmente à adoção de novas tecnologias que possibilitam a produção cada vez mais eficiente com diminuição de impactos e pressões sobre os recursos naturais. Assim, a intensificação produtiva em áreas rurais, tem sido promovida por meio de conhecimento, inovações e tecnologias agrícolas que aumentam rentabilidade e minimizam impactos ambientais. Igualmente importante, a gestão do uso e ocupação do solo e a ampliação da utilização de biológicos, a gestão de recursos hídricos no Brasil trazida Lei Federal nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 e outros atos normativos federal e estadual, tem sido consolidada através do conhecimento técnico-científico, a fim de nortear os múltiplos usos da água de maneira equitativa e eficiente, lastreando diferentes instrumentos de gestão e controle entre a demanda e a oferta hídrica que é regulada pela outorga do direito de uso da água, tendo a Bacia Hidrográfica como unidade territorial para a implementação e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que é utilizado como unidade de gestão da paisagem na área de planejamento ambiental.

Desta maneira, as atividades conduzidas em áreas rurais no Brasil, ao longo dos anos, têm demonstrado um papel estratégico para elevação da qualidade ambiental e

manutenção dos serviços ambientais e ecossistêmicos em diferentes regiões, associando a sustentabilidade conduzida no campo, ao desenvolvimento econômico, contribuindo com a geração de emprego e renda, reduzindo as desigualdades, e de maneira ampla contribuindo para ampliar a segurança alimentar. E, sem dúvida, o setor agropecuário vem demonstrando, que o cumprimento legal associado a números expressivos de produção é imprescindível para a manutenção do equilíbrio da balança comercial do país e, conseqüentemente, para a estabilidade econômica brasileira (Reis, 2022).

A condução de estratégias para avançar em diferentes frentes para ampliar a sustentabilidade conduzida em campo, incluindo medidas de preservação e restauração, especialmente no Cerrado, passa fundamentalmente pelo avanço nas análises do CAR em diferentes Estados, e de maneira paralela, com a implementação de políticas de incentivos voltadas a condução de uma agricultura diferenciada com baixa emissão de carbono, onde o aumento de produtividade associado principalmente ao melhor aproveitamento de áreas abertas, utilização racional dos solos e da água, os quais trarão ganhos imediatos para diferentes cadeias de suprimento.

A região de Cerrado que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), é considerada uma das grandes fronteiras agrícolas do mundo, representada por números expressivos de produtividade e produção, respondendo por grande parte da produção brasileira de grãos e fibras. Conforme dados da Embrapa (EMBRAPA 2020; 2024) a atividade agrícola na região que contempla cerca de 73 milhões de hectares distribuídos em 31 microrregiões e 337 municípios, ocupando cerca de 66,5 milhões de hectares (91% da área) no Cerrado, enquanto fatias menores estão contidas na Amazônia (5,3 milhões ha ou 7,3% da área) e Caatinga (1,2 milhão de hectares ou 1,7% da área). Ainda, conforme dados da EMBRAPA (2024), há cerca de 4.800.000 hectares com plantio de soja que somaram a produção total de 18,5 milhões de toneladas na safra 2022/23, o que representa cerca de 12,3% do total produzido no Brasil.

Considerando os números de produção, produtividade e a vegetação ainda conservada em sua maior proporção, os olhares do mundo estão voltados para estas áreas despertando interesse de especialistas de diferentes áreas, os quais indicam uma grande oportunidade para o desenvolvimento da agricultura sustentável, onde ocorre a integração do cumprimento legal, com a eficiência, inovação e tecnologia para suprir a grande demanda do mercado por produtos diferenciados e mais sustentáveis, os quais trazem não somente o cumprimento legal, mais principalmente um compromisso ambiental prático, com a adoção práticas de gestão integrada do uso e ocupação do solo e da água, utilização de bioinsumos, rastreabilidade, associados a conservação dos recursos naturais, tendo como premissa prioritária a redução das emissões de carbono, buscando por uma agricultura sustentável e regenerativa.

Neste cenário, onde o mundo busca e requer uma agricultura mais sustentável para suprir uma demanda grande por alimentos, os mecanismos financeiros devem ser direcionados para políticas de incentivos, onde a condução da atividade rural sustentável deverá ser priorizada, as quais considerem não somente áreas consolidadas em processo ativo de produção, mas principalmente as áreas ainda conservadas e/ou preservadas, mas ainda passíveis de autorização de supressão de vegetação conforme previsão na legislação brasileira (que é bastante rígida, extensa e transversal sobre diferentes aspectos), no que diz respeito a localização, implantação e operação dos empreendimentos rurais. Assim, instrumentos impositivos, sobre diferentes aspectos devem respeitar principalmente a legislação do país e considerar medidas prioritárias de

compensação efetivas, considerando principalmente o direito de propriedade e a legislação brasileira.

Neste contexto, e para atender uma demanda do mercado, cada vez mais exigente na produção de alimento, incluindo a sustentabilidade e equidade social e ambiental, Rodrigues (2020a) já chamava a atenção dos desafios a serem enfrentados, não somente pelo produtor rural; e destaca a necessidade de uma gestão adequada, capaz de considerar as especificidades inerentes a cada setor e usuário, com integração efetiva das ações institucionais e das políticas públicas setoriais, exemplificando a necessidade da integração de ações voltadas a segurança alimentar, associado a segurança hídrica e energética. Contudo, para isso aconteça, é necessário o atendimento da legislação da maneira integrada, tendo como premissa, também que a água tem usos múltiplos, essencial para o desenvolvimento de diversas atividades, inclusive atividade econômica, que exige ações de governança, planejamento, gestão e monitoramento, essenciais para o seu uso equitativo e racional.

Ainda, de acordo com Rodrigues (2020b), o desenvolvimento de uma agricultura sustentável passa, necessariamente, pelo uso sustentável dos recursos hídricos, que, por sua vez, depende de uma gestão que incorpore os usos múltiplos da água e considere os fundamentos e diretrizes da Política Nacional de Recursos Hídricos, fortalecendo os mecanismos que contribuem para aumentar a oferta hídrica na bacia hidrográfica, entre esses, os sistemas de conservação de solo, que estão em constante adaptação e evolução, e apresentam o maior potencial de contribuição para os recursos hídricos em termos de sua qualidade e quantidade, destacando os mecanismos destinados ao controle da erosão, dessalinização, redução da evaporação e aumento da infiltração e da capacidade de retenção da água no solo.

Para a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (2017), se por um lado existe a preocupação com a disponibilidade da água, por outro existe a questão básica relacionada à necessidade de produzir alimentos, em maior quantidade e qualidade, indicando a necessidade de aumentar a atual produção de alimentos entre 60 e 70% até 2050 para atender à demanda crescente da população que irá superar os 9 bilhões de pessoas. Considerando as condições limitadas para expansão da área plantada, a FAO estima que 90% deste crescimento deverá vir do aumento da produtividade, em diferentes regiões do mundo. Assim, a produção de alimentos, em diferentes regiões, deve ser vista através de uma abordagem sistêmica que considere os aspectos legais, ações integradas de governança, aumento de produtividade e mitigação dos impactos ambientais. Corroborando com esta afirmativa, Rodrigues e Domingues (2020) descrevem que para que isto aconteça, é necessário intensificar a agricultura de maneira sustentável melhorando a eficiência dos sistemas agrícolas, tornando-os mais produtivos, sem perder de vista a resiliência dos sistemas naturais, e o aperfeiçoamento da produção, considerando ganhos de produtividade, mantendo claramente a presença dos fatores essenciais para a consolidação do desenvolvimento sustentável no Cerrado.

Ainda, conforme o relatório da OECD-FAO (2023), as soluções de mitigação e adaptação dos sistemas de produção agrícola abrangem a adoção em larga escala de processos e de tecnologias de produção inteligentes e neutras em carbono; e de maneira, adicional diferentes estudos têm demonstrado a importância de aumentar a produção em áreas abertas e consolidadas, diminuído a pressão sobre a abertura de novas áreas a fim de evitar novas conversões e desmatamentos. Desta maneira, somando a essa grande demanda por alimentos mais saudáveis e uma agricultura mais sustentável associada também a redução das emissões de carbono, é imprescindível o fomento a condução de políticas públicas de compensação e estratégias de valorização de ativos ambientais que

fomentam o aumento de produtividade, o melhor aproveitamento de áreas abertas e a restauração de áreas degradadas. Contudo é essencial a definição de estratégias claras e condução de práticas de governança transparentes para ampliar a conservação e/ou preservação, respeitando os direitos de propriedade, os direitos dos povos e comunidades tradicionais, a fim de melhorar o ambiente de negócios no meio rural e contribuir de maneira efetiva e integrada com adequação ambiental das cadeias produtivas no Brasil, pois é reconhecido que além do cumprimento da legislação, que é extensa e rígida, é imprescindível a adoção de práticas conservacionistas de todos os recursos envolvidos no processo produtivo e essenciais para a manutenção das atividades no campo.

Neste contexto, é importante destacar que o manejo e conservação do solo e da água, a preservação e/ou recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal, além de adoção de programas voltados a conscientização em conjunto, promovem benefícios coletivos e garantem a sustentabilidade em diferentes ações conduzidas em áreas rurais no Brasil. A Figura 3 demonstra uma área produtiva com área de Reserva Legal no Cerrado.

Dessa maneira, o Brasil entre tantas vantagens comparativas merece destaque não somente pela legislação que lastreia todas as atividades rurais, mas também pelo grande instrumento de monitoramento o CAR, que pode nortear de maneira efetiva a preservação e/ou a restauração de grandes remanescentes de vegetação nativa no Cerrado, essenciais para a manutenção dos recursos naturais.

Figura 3 - Imóvel Rural com área de Reserva Legal e Área Produtiva



Fonte: Marcelo Braz de Oliveira Braga (2024).

15.4 Considerações finais

O Cerrado tem recebido maior atenção a cada ano. Essa atenção deve ser acompanhada da condução de políticas públicas efetivas que fomentem a maximização da adoção de boas práticas, associadas à pesquisa e à inovação, com o uso da tecnologia, que contribuam para ampliar sustentabilidade em diferentes regiões.

A implementação efetiva do Código Florestal, incluindo diferentes mecanismos a exemplo do CAR, PRA, CRA, Programas de valorização de ativos ambientais associados ao PSA e ao Carbono são ferramentas essenciais para repensar o processo de ocupação do Cerrado, onde, promoção de modelos de uso e ocupação solo diferenciados e mais sustentáveis, devem ser priorizadas.

Os compromissos assumidos pelo Brasil, para a redução das emissões de carbono, devem estar estreitamente associados ao cumprimento da legislação, ao fomento de políticas públicas de compensação e estratégias de valorização de ativos ambientais, adoção de boas práticas voltadas ao aumento de produtividade, reposição florestal e restauração de áreas degradadas.

As estratégias de condução de uma atividade rural mais sustentável, visam ampliar a produtividade em áreas consolidadas (abertas) atendendo a legislação atual brasileira, mas também corroborando a FAO no que se refere a necessidade do desenvolvimento agrícola cada vez mais sustentável, associado ao esforço contínuo para ampliar a segurança alimentar, tendo como premissa o compromisso de uma produção cada a vez mais limpa, equitativa e justa, considerando também que o Brasil tem uma legislação ambiental rígida e bastante complexa quando comparada com outros países do mundo.

O desafio de desenvolver a produção cada vez mais sustentável tem exigido não somente o cumprimento da legislação brasileira, mas também ao acesso e condução de diversas estratégias e políticas públicas, que permeiam a geração, adoção e difusão de tecnologias adequadas, associadas a estruturação de sistemas de informações cada vez mais integrados, eficientes e rastreáveis, que considere as áreas rurais e seus múltiplos usos e importância, visando atender as expectativas de mercados diversos e cada vez mais exigentes.

As diferentes ferramentas trazidas pela legislação, somadas a condução efetiva de boas práticas em áreas rurais tem colaborado ao longo dos anos para colocar o setor agropecuário brasileiro na vanguarda da sustentabilidade mundial, demonstrada nos altos índices de produção e produtividades das diversas *commodities*.

A aplicação efetiva do Código Florestal, associada ao cumprimento de uma legislação brasileira rígida, tendo como premissa a implementação do CAR trará grandes avanços para ampliar as áreas preservadas em diferentes regiões do Brasil.

É imprescindível que o Cerrado seja visto não somente pela sua importância ambiental, mais também pela sua função estratégica na produção sustentável e diferenciada de diferentes *commodities*; colaborando com esta afirmação, o produtor rural deve se considerar o grande protagonista na condução de ações de sustentabilidade e essencial na priorização da preservação dos serviços ecossistêmicos.

Referências

BRASIL. **Cadastro Ambiental Rural - CAR**. 2024. Disponível em: <https://www.car.gov.br/#/>; <https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>. Acesso em: 04 mar. 2024.

BRASIL. Lei Federal nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem, a rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e das embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, de produtos de controle ambiental, de seus produtos técnicos e afins. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14785.htm#art65. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 14.590, de 24 de maio de 2023. Altera a Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006, que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável, a Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007, que dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, e a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009, que cria o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14590.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nºs 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114119.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2020. Instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 20 out.2020.

BRASIL. Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015. Regulamenta o inciso II do § 1º e o § 4º do art. 225 da Constituição Federal, o Artigo 1, a alínea *j* do Artigo 8, a alínea *c* do Artigo 10, o Artigo 15 e os §§ 3º e 4º do Artigo 16 da Convenção sobre Diversidade Biológica, promulgada pelo Decreto nº 2.519, de 16 de março de 1998; dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético, sobre a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado e sobre a repartição de benefícios para conservação e uso sustentável da biodiversidade; revoga a Medida Provisória nº 2.186-16, de 23 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13123.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.787, de 11 de janeiro de 2013. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação; altera o art. 25 da Lei 10.438, de 26 de abril de 2002; revoga as Leis nos 6.662, de 25 de junho de 1979, 8.657, de 21 de maio de 1993, e os Decretos-Lei 2.032, de 9 de junho de 1983, e 2.369, de 11 de novembro de 1987; e dá outras providências, 2013. **Diário Oficial da União**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112787.htm. Acesso em: 01 ago. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências, 2012. **Diário Oficial da União**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 02 ago. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, 2011. **Diário Oficial da União**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: out./2020.

BRASIL. Lei Federal nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 11.284, de 2 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nºs 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11284.htm. Acesso em: 20 out. 2020.

BRASIL. Lei Federal nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm. Acesso em: 20 out. 2020.

BRASIL. Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000. que regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza entre outros aspectos. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, também conhecida como a Lei de Crimes Ambientais. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art.

1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 23 mar. 2021.

BRASIL. Lei Federal nº 8.174, de 30 de janeiro de 1991. que dispõe sobre a Política Agrícola Brasileira; dispõe sobre princípios de Política Agrícola, estabelecendo atribuições ao Conselho Nacional de Política Agrícola (CNPA), tributação compensatória de produtos agrícolas, amparo ao pequeno produtor e regras de fixação e liberação dos estoques públicos. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8174.htm. Acesso em: 23 mar. 2021.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, 1981. **Diário Oficial da União**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 20 out. 2020.

BRASIL. Lei Federal nº 6.225, de 14 de julho de 1975. Dispõe sobre discriminação, pelo Ministério da Agricultura, de regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6225.htm. Acesso em: 27 dez. 2023.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA/ESALQ/CNA. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. 2024. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em 24 mar. 2024.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Conab atualiza a estimativa da Safra de Grãos 2023/2024**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5258-conab-atualiza-a-estimativa-da-safra-de-graos-2023-2024-que-deve-chegar-a-316-7-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CONTIN, E.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; GASQUES, J. G.; VIEIRA JUNIOR, P. A. O papel das políticas públicas no Cerrado. *In: Dinâmica Agrícola no Cerrado: análises e projeções*. Édson Luis Bolfe, Edson Eyji Sano, Silvia Kanadani Campos (Editores Técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2020. 312p.il.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Dinâmica agrícola no Cerrado: análises e projeções**. Édson Luis Bolfe, Edson Eyji Sano, Silvia Kanadani Campos (Editores Técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2020. ISBN 978-85-7035-951-3 v. 1.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-matopiba/sobre-o-tema>. Acesso em: 20 fev. 2024.

FAO - Food and Agriculture Organization. **The future of food and agriculture - Trends and challenges**. Rome, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GIUDICE, R. DEL. O Código Florestal e o Cenário Político Brasileiro. *In: Código Florestal Avaliação: 2017/2020*. 8-14p.il. Observatório do Código Florestal – IPAM. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2021/12/O-avanco-da-implementacao-do-Codigo-Florestal-no-Brasil-IPAM_V11-1-1.pdf. Acesso em: 04 fev. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação

Brasileira. 2ª Edição revisada e ampliada. Manuais Técnicos em Geociências. São Paulo. IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências**. 271p. 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas e de vegetação**. Rio de Janeiro, 2004.

MMA - Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – NDC – a ambição climática do Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>. Acesso em: 20 dez. 2023.

OECD - Organisation for Economic Co-Operation and Development; FAO - Food and Agriculture Organization of The United Nations **Agricultural Outlook 2023–2032**; OECD Publishing: Paris, France, 2023.

REIS, A. T. C. C. A sustentabilidade da agricultura irrigada com base nos aspectos legais In: **Agricultura irrigada no Brasil: políticas públicas** [recurso eletrônico] / organização de Alysson Paolinelli, Durval Dourado Neto e Everardo Chartuni Mantovani. - Piracicaba: ESALQ; Viçosa: ABID. 2022 238p. 1-14p.il.

RODRIGUES, L. **Mitos e Fatos na agricultura irrigada** (Parte III), 2020a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/55110512/mitos-e-fatos-na-agricultura-irrigada-parte-iii>. Acesso em: 20 dez. 2020.

RODRIGUES, L. **Intensificação e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas**, 2020b. Disponível em: https://www.embrapa.br/olhares-para-2030/intensificacao-e-sustentabilidade-dos-sistemas-de-producao-agricolas/-/asset_publisher/MpEPEYHn8qxt/content/lineu-neiva-rodrigues?inheritRedirect=true. Acesso em: 20 dez. 2020.

RODRIGUES, L.; DOMINGUES, A.F. **Agricultura irrigada desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/168474/1/Agricultura-Irrigada.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.

CERRADO

SUSTENTABILIDADE, AGRONEGÓCIO E INOVAÇÃO



ISBN: 978-65-01-03817-9

