

AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO

subsídios para o
desenvolvimento
sustentável

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

6 ÁGUA POTÁVEL
E SANEAMENTO



Lineu Neiva Rodrigues
Editor Técnico

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura e Pecuária*

AGRICULTURA IRRIGADA NO CERRADO

**subsídios para o
desenvolvimento sustentável**

Lineu Neiva Rodrigues
Editor Técnico

Embrapa
Brasília, DF
2023

Exemplar desta publicação disponível
gratuitamente em:
<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970, Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Lineu Neiva Rodrigues

Secretário-executivo

Gustavo José Braga

Secretária

Alessandra S. Gelape Faleiro

Membros

Alessandra Silva Gelape Faleiro

Alexandre Specht

Edson Eyji Sano

Fábio Gelape Faleiro

Gustavo José Braga

Jussara Flores de Oliveira Arbues

Kleberon Worsley Souza

Maria Madalena Rinaldi

Shirley da Luz Soares Araújo

Supervisão editorial e revisão de texto

Jussara Flores de Oliveira Arbues

Normalização bibliográfica

Shirley da Luz Soares Araújo

Projeto gráfico, diagramação, capa e
tratamento das imagens

Wellington Cavalcanti

1ª edição

Publicação digital (2023): PDF

1ª impressão (2023): 500 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução desta publicação, no todo ou
em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

A278 Agricultura irrigada no cerrado : subsídios para o desenvolvimento
sustentável / Lineu Neiva Rodrigues, editor técnico – Brasília, DF :
Embrapa, 2023.

PDF (200 p.) : il. color.

ISBN 978-65-89957-83-6

1. Agricultura irrigada. 2. Cerrado. 3. Recurso hídrico. I. Rodrigues,
Lineu Neiva. II. Embrapa Cerrados.

CDD (21 ed.) 631.7

Shirley da Luz Soares Araújo (CRB-1/1948)

© Embrapa 2023

Autores

Daniel Althoff

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, consultor, Cuiabá, MT

Diego Bispo dos Santos Farias

Engenheiro-agrônomo, mestre em Engenharia Agrícola, estudante de doutorado em Engenharia agrícola, Viçosa, MG

Edson Eyji Sano

Geólogo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Giovana Maranhão Bettiol

Geógrafa, mestre em Ciências Ambientais, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

José Eloi Guimarães Campos

Geólogo, doutor em Geologia, professor titular de Hidrogeologia na Universidade de Brasília, Brasília, DF

Lineu Neiva Rodrigues

Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Níckolas Castro Santana

Geógrafo, doutor em Geografia, pesquisador colaborador da Universidade de Brasília, Brasília, DF

Vagney Aparecido Augusto

Geólogo, doutor em Recursos Hídricos e Meio Ambiente, consultor, Brasília, DF

Dedico a todas as pessoas que produzem alimento
no Cerrado e cuidam do meio ambiente.



Foto: Cristiano Del Nero

Não conseguiremos atender à demanda crescente por alimentos sem um meio ambiente saudável; por outro lado, não teremos um meio ambiente saudável sem uma agricultura forte e sustentável.

Lineu N. Rodrigues



Agradecemos às instituições que foram importantes parceiras na elaboração desse livro. Entre elas: Embrapa Cerrados, Universidade Federal de Viçosa, Unesp Câmpus de Botucatu e Universidade de Brasília.

Às instituições que são responsáveis diretas pela coleta, manutenção e distribuição de dados hidrometeorológicos. As bases de dados mantidas por essas instituições são indispensáveis para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Brasil. São várias instituições espalhadas pelo país que fazem esse trabalho, entre elas: a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

À Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), em nome da diretoria de Gestão dos Empreendimentos de Irrigação, pelo apoio na publicação impressa deste livro.

Ao professor Fernando Tangerino e às empresas NaanDanJain, Valmont, Netafim e Senninger pela cessão das fotos ilustrativas.



Apresentação

A intensificação da agricultura na região do Cerrado é considerada uma das principais estratégias para o seu desenvolvimento sustentável, sendo a irrigação uma das tecnologias mais promissoras. Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento contínuo da agricultura irrigada na região, que já concentra aproximadamente 80% dos pivôs centrais existentes no País.

Por outro lado, observa-se o aumento das disputas pelo uso de água em regiões do Cerrado, trazendo desafios para o crescimento da agricultura irrigada na região. Nesse contexto, com vistas à manutenção do desenvolvimento sustentado da agricultura no Cerrado, é indispensável estabelecer as bases para o fortalecimento e o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada na região.

A irrigação, com geração de empregos estáveis e duradouros, contribui para o desenvolvimento social e econômico do país, além de reduzir as pressões sobre áreas de vegetação nativa, uma vez que as áreas irrigadas podem produzir até três vezes mais que as de sequeiro. O crescimento da agricultura irrigada, entretanto, deve estar inserido em um planejamento estratégico de médio e longo prazo, em que seguranças hídrica e energética são a base para o seu desenvolvimento sustentado.

Políticas de estado que visem à segurança alimentar, o combate à fome e à pobreza, devem incluir a agricultura irrigada como uma das estratégias mais importantes. O objetivo deste livro foi apresentar informações essenciais para o desenvolvimento da agricultura irrigada na região do Cerrado.

Este trabalho contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente os Objetivos de números 2 e 6. O ODS 2 visa acabar com a fome e dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos, enquanto o ODS 6 visa aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água.

Sebastião Pedro da Silva Neto
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Prefácio

Este livro foi escrito com o objetivo de ser uma referência para consulta sobre os elementos fundamentais para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Cerrado.

O Brasil se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, respondendo por quantidades significativas das exportações agrícolas globais. Neste contexto, o papel do país será cada vez mais relevante no desafio de aumentar a produção de alimentos necessária para alimentar a população em 2050.

Neste cenário, o Cerrado é uma das regiões estratégicas do mundo. Segundo os estudos, o Cerrado, com cerca de 70% dos seus 204 milhões de hectares com potencial para desenvolvimento da agricultura, é o segundo maior bioma em extensão e a principal fronteira agrícola do Brasil, respondendo por mais de 40% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país.

As mudanças do clima, entretanto, trazem incertezas quanto à produção de alimentos, colocando em risco a estabilidade da produção de alimentos e o atingimento da meta de atender a demanda de alimentos necessária em 2050. Esse fato faz da irrigação uma tecnologia cada vez mais indispensável ao processo produtivo.

O principal desafio para o desenvolvimento sustentável da agricultura é conciliar o crescimento da irrigação com a disponibilidade de

recursos hídricos, em especial nas regiões que já se encontram em situação de escassez hídrica.

Alimento e água são elementos essenciais para a existência humana e, juntamente com a energia, são indispensáveis para o desenvolvimento da economia, redução da pobreza e melhoria da qualidade de vida das pessoas. A forte inter-relação entre água, alimento e energia, que é intensificada com o aumento da demanda advinda do crescimento populacional, das mudanças climáticas e dos padrões de consumo, traz desafios às seguranças hídrica, alimentar e energética.

Nesse sentido, é fundamental considerar as desigualdades hídricas regionais e ter um olhar diferenciado para as bacias hidrográficas críticas, onde a disponibilidade hídrica já está comprometida, assim como onde já é realidade a ocorrência de conflitos pelo uso da água.

Foi em atenção a esses diversos desafios que este livro foi escrito. Acreditamos que informação produzida com base científica pode contribuir efetivamente para a sustentabilidade da produção de alimentos.

Assim, o objetivo deste livro é disponibilizar informações essenciais para subsidiar o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada na região do Cerrado. Nesta primeira edição, o livro foi organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo destaca a importância da agricultura irrigada para a sustentabilidade da produção de alimentos no Cerrado. O segundo capítulo apresenta uma visão do bioma Cerrado, destacando a população, os recursos estratégicos e o meio físico. O clima é abordado no terceiro capítulo e os recursos hídricos no quarto. O quinto capítulo traz uma visão do potencial hidrogeológico da região. O sexto capítulo destaca as massas de água e o último capítulo aborda a agricultura irrigada no Cerrado.

Lineu N. Rodrigues

Sumário

CAPÍTULO 1 – Importância da Agricultura Irrigada para a Sustentabilidade da Produção de Alimentos no Cerrado	19
Introdução.....	20
Polos de irrigação	25
Considerações finais	27
Referências	30
CAPÍTULO 2 – O Bioma Cerrado	35
Introdução.....	36
População.....	38
Recursos estratégicos do Cerrado	42
Meio físico	47
Referências	57
CAPÍTULO 3 – O Clima do Cerrado.....	61
Introdução.....	62
Precipitação	65
Evapotranspiração.....	79
Referências	87

CAPÍTULO 4 – Recursos Hídricos Superficiais no Cerrado	91
Introdução	92
Disponibilidade hídrica.....	93
Contribuição do Cerrado para as regiões hidrográficas	97
Critérios de outorga.....	100
Vazões de referência (assinaturas hidrológicas)	106
Referências	112
CAPÍTULO 5 – Potencial Hidrogeológico do Cerrado	115
Introdução	116
Aspectos conceituais	118
Aspectos legais sobre o uso das águas subterrâneas	126
Potencial dos aquíferos rasos e profundos no Cerrado....	130
Principais aquíferos que ocorrem no Cerrado brasileiro ..	135
Outros Aquíferos	149
Sustentabilidade da exploração dos aquíferos no Cerrado.....	149
Considerações finais	153
Referências	155
CAPÍTULO 6 – Massas de Água no Cerrado	161
Introdução	162
Mapeamento das massas de água no Cerrado	162
Área ocupada por barragens artificiais.....	170
Volume armazenado e evaporação	173
Referências	175

CAPÍTULO 7 – Agricultura Irrigada no Cerrado	177
Introdução	178
Uso da água na agricultura irrigada	179
Área irrigada e área com potencial para crescimento da irrigação	180
Áreas irrigadas por pivô central	188
Principais culturas irrigadas	195
Referências	199

CAPÍTULO 1

Importância da Agricultura Irrigada para a Sustentabilidade da Produção de Alimentos no Cerrado

Lineu Neiva Rodrigues

Daniel Althoff

Níckolas Castro Santana

Diego Bispo dos Santos Farias

Fotos: Fabiano Bastos (da esquerda para a direita - 1 e 2), Leo Miranda (da esquerda para a direita - 3 e 4) e Paulo Lanzetta (primeiro plano).



Introdução

Projeções relacionadas ao expressivo aumento da população mundial para o ano de 2050 indicam que haverá um aumento de 70% na demanda por alimentos (High Level..., 2015). Nesse cenário, o Brasil desempenhará papel cada vez mais estratégico. O país se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, respondendo por aproximadamente 7,3% das exportações agrícolas globais (Food and Agriculture Policy Decision Analysis, 2014; Allen; Valdes, 2016; Meade et al., 2016), tendo movimentado, entre 2018 e 2019, US\$ 102,14 bilhões (Brasil, 2019).

O Cerrado (Figura 1), segundo maior bioma brasileiro, com área de aproximadamente 200 milhões de hectares, representando 24% do território brasileiro, cobre total ou parcialmente 13 estados. Apenas o Distrito Federal está inteiramente inserido no Cerrado. Os estados com maior porcentagem de Cerrado em seus territórios são Goiás, com 98% e Tocantins, com 91%, enquanto os estados Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Pará, Piauí e São Paulo possuem, respectivamente, 37%, 62%, 54%, 18%, 65%, 0,7%, 52% e 18% de suas áreas inseridas nesse bioma.

A zona de transição entre o Cerrado e os outros biomas forma uma área com alta diversidade de espécies, desde florestais, nas transições com os biomas Amazônia e Mata Atlântica, até semiáridas, na transição com o bioma Caatinga. Essas zonas de transição também são conhecidas pela alta sazonalidade climática, e alta vulnerabilidade a mudanças ambientais (Terra et al., 2018; Marques et al., 2020).

A localização do Cerrado e o seu padrão geomorfológico o tornam um dos principais pilares da hidrogeografia brasileira, dada a sua distribuição de águas para diversas bacias brasileiras e da América do Sul (Sano et al., 2019). Grande parte dos rios que abastecem os biomas brasileiros tem suas nascentes localizadas no bioma Cerrado.



Figura 1. O bioma Cerrado e sua localização em relação aos demais biomas no território brasileiro.

Fonte: IBGE (2021).

Grande parte da produção brasileira de alimentos vem da região do Cerrado. Uma das razões do sucesso da agricultura no Cerrado está associada a uma longa estação chuvosa, que, em geral, ocorre entre os meses de outubro a abril, o que possibilita que se tenha até duas safras em uma mesma estação (Spangler et al., 2017). Outro ponto evidente é a disponibilidade de água nessas regiões. Além disso, a região apresenta um elevado potencial para expansão de suas áreas irrigadas (Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2014).

O atendimento ao crescimento da demanda por alimentos pode ocorrer por meio da expansão da área plantada e/ou por meio do aumento do rendimento das culturas (Pradhan et al., 2015). No período entre 1985 e 2005, a produção global de alimentos cresceu 28%. Desse total, apenas 8% resultou da expansão da área plantada e o restante, 20%, decorreu do aumento da produtividade (Foley et al., 2011).

No período entre 1970 e 2013, a produção brasileira de grãos teve uma expansão de quase oito vezes, resultante dos ganhos contínuos de produtividade, em razão da incorporação de novas tecnologias ao processo produtivo (Embrapa, 2014). Embora não seja uma tecnologia nova, a irrigação tem se modernizado constantemente, contribuindo efetivamente para os ganhos observados na produtividade e para a redução no uso de insumos básicos, como, por exemplo, os recursos hídricos.

Relatório da FAO (2011) indica que a irrigação tem contribuído de maneira significativa para aumentar a produção e a produtividade agrícola em escala global. Na Índia e na China, por exemplo, de 1964 a 1997, a produção triplicou principalmente em razão de investimentos em irrigação e de medidas adotadas para aumentar a produtividade do uso da água e da terra.

O desenvolvimento sustentado da agricultura no Cerrado passa por um crescimento sustentável da irrigação nessa região. Esse cresci-

mento 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.

Em virtude da sua importância, cada vez mais estratégica, tem-se observado para este bioma um crescimento contínuo da agricultura irrigada, a qual já representa cerca de 60% da irrigação praticada no Brasil (Brasil, 2014). Estudos realizados por Althoff e Rodrigues (2019) indicaram que aproximadamente 80% dos pivôs centrais do País estão localizados no Cerrado. Considerando um crescimento médio de 56 mil hectares por ano, estima-se que, em 2050, a área irrigada poderá atingir até 3 milhões de hectares, podendo impactar a dinâmica de uso de água na região.

A intensificação sustentável da agricultura no Cerrado é considerada uma das principais estratégias para reduzir desequilíbrios nesse ecossistema. Nesse contexto, a agricultura irrigada é uma das tecnologias mais promissoras, sendo necessário conciliar a sua expansão com a disponibilidade de recursos hídricos, em especial, nas regiões que já se encontram em situação de escassez hídrica (Rodrigues, 2017).

Por outro lado, já se observa um aumento no número de disputas pelo uso de água em regiões do Cerrado, principalmente naquelas regiões em que a expansão de áreas irrigadas se deu com pouco planejamento e pouco uso de informações hidrológicas (Pousa et al., 2019). Além disso, estudos considerando diferentes projeções das mudanças climáticas apontam diversos riscos para o desenvolvimento socioeconômico de regiões do Cerrado. Entre os impactos esperados, pode-se citar o aumento da temperatura e a redução da precipitação (Chou et al., 2014), o prolongamento da estação seca (Pires et al., 2016) e a redução da vazão disponível em cursos d'água (Oliveira et al., 2017).

Considerando o atual cenário de uso da água e a tendência de aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos, é necessário que

haja um planejamento adequado do crescimento da agricultura irrigada na região, sendo fundamental que se tenha informações técnicas suficientes para subsidiar esse planejamento.

A agricultura irrigada agrega benefícios importantes à agricultura no Cerrado, propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. Ela, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, principalmente no período seco (abril a setembro). Assim, caso não seja adequadamente planejada e gerenciada, a expansão da agricultura irrigada poderá agravar ainda mais as disputas pelo uso de água em regiões do Cerrado.

Melhorar a eficiência de irrigação é uma estratégia que pode contribuir para aumentar a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada (Zhang et al., 2004; Mo et al., 2005; Levidow et al., 2014; Bastiaanssen; Steduto, 2017). Adicionalmente, considerando o atual cenário de uso da água no Cerrado e a tendência de aumento de conflitos por esse recurso, torna-se importante produzir mais com o uso de quantidades cada vez menores de água, e, para isso, é fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam contribuir para o uso eficiente de água.

Frente ao paradigma de que aumentar a produção de alimentos implica no aumento da demanda de água, um recurso escasso e estratégico para toda a economia, a agricultura será cada vez mais pressionada a aumentar a eficiência do uso de seus insumos.

A agricultura irrigada, por sua vez, tem ainda o desafio de melhorar a eficiência de uso de dois insumos estratégicos para a sociedade: água e energia. Além disso, a cada dia, fica mais clara a premissa de que, para compatibilizar o aumento da produção com as demandas ambientais, será necessário embasar os processos produtivos em inovação e uso de tecnologias (Rodrigues; Domingues, 2017).

Polos de irrigação

Em 25 de abril de 2019, a portaria nº 1.082, criada pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), estabeleceu a iniciativa de polos de produção irrigada que é integrada às ações de implementação da política nacional de irrigação. A iniciativa é uma estratégia do MIDR para alavancar a agricultura irrigada, envolvendo participações de organizações de produtores até as diversas esferas do governo.

A proposta para implantação dos polos foi dividida em quatro fases fundamentais: a implantação prévia dos polos; a realização de oficinas de planejamento e reconhecimento; a indicação dos projetos a serem priorizados; e a implementação e o acompanhamento de projetos. A seleção prévia dos polos passa por alguns critérios do MIDR, tais como: a presença de uma associação de irrigantes; a relevância da produção irrigada para a região; e o potencial de expansão ou de aumento de produtividade com técnicas eficientes de irrigação.

Até julho de 2022, oito polos de irrigação, representando uma área irrigada de 1.128.878 ha e área irrigável de 6.014.601 ha, haviam sido reconhecidos pelo MDR: o Polo de Agricultura Irrigada da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria e o Polo de Irrigação Noroeste Gaúcho (RS); o Polo de Irrigação Oeste da Bahia (BA); o Polo de Irrigação Sustentável do Sul de Mato Grosso (MT); o Polo de Irrigação Sustentável do Noroeste de Minas (MG); o Polo de Irrigação Sustentável do Vale do Araguaia; o Polo de Irrigação do Planalto Central de Goiás (GO); e o Polo de Irrigação do Sudoeste Paulista (SP).

A Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) denomina também as regiões com grandes concentrações de irrigação de “polos de irrigação” e destaca 28 polos ativos de irrigação no Brasil (Agência Nacional de Água, 2021). Esses polos são áreas especiais de gestão de recursos hídricos para a agricultura irrigada em escala nacional.

Esse mesmo estudo mostrou que em 15 desses polos de irrigação há a predominância do sistema de irrigação tipo pivô central em cultivo de grãos. A maior parte desses polos está localizada no Cerrado (12 polos nacionais de pivôs centrais), que concentra 64% (735 mil ha) de área equipada por esse sistema de irrigação.

Na Figura 2, apresenta-se os polos de irrigação que estão presentes no Cerrado. Excetuando-se o polo Javaés/Formoso (arroz inundado), nos demais, o sistema predominante é o pivô central. Entre os polos presentes no Cerrado, o que possui maior área irrigada é o Guaíra/Miguelópolis com 23% do território irrigado.

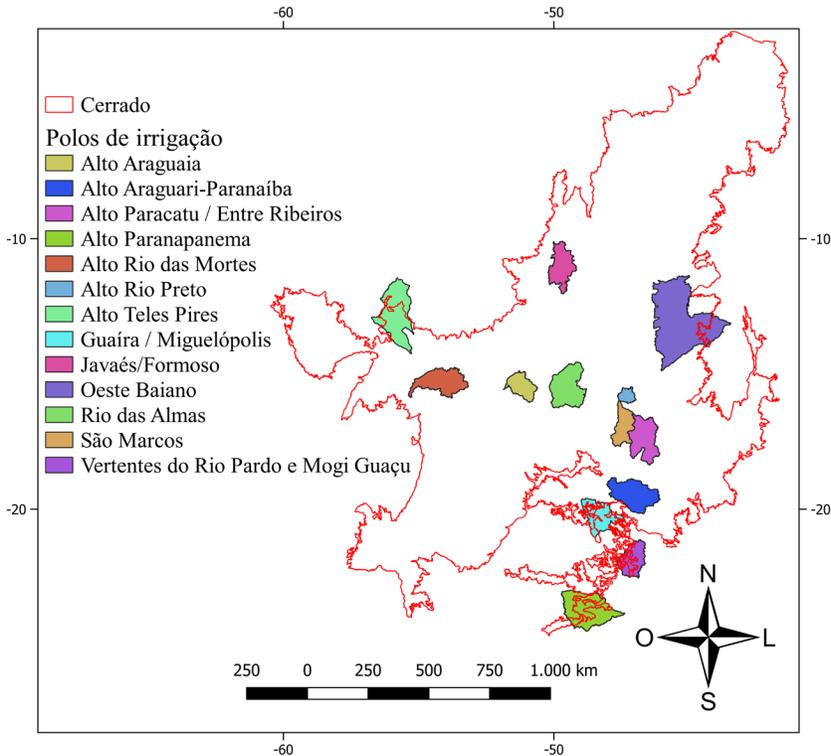


Figura 2. Polos de agricultura irrigada presentes no Cerrado.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

Considerações finais

A manutenção de uma agricultura sustentável no Cerrado é crucial para atender a demanda mundial de alimentos. Neste contexto, o fortalecimento da irrigação é estratégico, pois a irrigação contribui para o desenvolvimento social e econômico do país, com geração de empregos estáveis e duradouros, além de reduzir as pressões sobre áreas de vegetação nativa, uma vez que as áreas irrigadas podem produzir até três vezes mais que a de sequeiro, além de trazerem maior rentabilidade aos produtores. A irrigação traz benefícios em relação a:

1. Produção	<ul style="list-style-type: none"> a. Produtividade média: três vezes maior que a de sequeiro, podendo, em algumas culturas, como o arroz, chegar até seis vezes. b. Estabilidade: reduz a variabilidade anual da produção, pois reduz os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas. c. Oportunidade: viabiliza a produção de certas culturas, como, por exemplo, as hortaliças. d. Efetividade: viabiliza a produção durante todo o ano, inclusive no período seco, e em regiões com baixa disponibilidade hídrica. e. Qualidade: garante mais qualidade ao produto, aumentando o seu valor agregado.
2. Geração de emprego	Geração de dois a seis empregos por hectare na cadeia.
3. Desenvolvimento social	Em 2019, o valor da produção irrigada foi igual a R\$ 55 bilhões, aumentando o produto interno bruto e contribuindo para reduzir a pobreza.
4. Meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> a. Redução da demanda por abertura de novas áreas para produção de alimentos. No mundo, são 300 milhões de hectares preservados. b. Aumento do sequestro de carbono.

O objetivo de produzir mais alimentos deve ser visto dentro de uma abordagem mais ampla, considerando os aspectos de sustentabilidade ambiental, ou seja, buscando produzir mais alimentos com melhor qualidade e com menores impactos aos recursos naturais. O desafio técnico será produzir tecnologias para garantir segurança alimentar e nutricional para a população sem aumentar os impactos negativos da agricultura ao meio ambiente (Rodrigues; Domingues, 2017).

O Brasil possui uma forte rede de instituições de pesquisa capaz de gerar tecnologias que contribuam para a produção sustentável de alimentos. Assim, os principais desafios da agricultura irrigada brasileira não são tecnológicos. Para que a agricultura irrigada possa se consolidar, utilizando plenamente todas as vantagens da tecnologia disponível, é preciso garantir aos irrigantes as bases para o seu desenvolvimento, ou seja, é preciso que ele tenha segurança ambiental, hídrica, energética e jurídica para o seu negócio.

Se existe tecnologia disponível, o que tem dificultado o desenvolvimento da agricultura irrigada?

Barros et al. (2009) fizeram um amplo levantamento de informações, entrevistaram atores dos diferentes segmentos da agricultura irrigada e identificaram um conjunto de temas relacionados às causas da baixa utilização do potencial das áreas irrigáveis do País:

- Energia elétrica e agricultura irrigada: disponibilidade, qualidade e custo de energia elétrica.
- Pesquisa, tecnologia e assistência técnica para a agricultura irrigada: o acesso limitado ao conhecimento aplicado à irrigação foi apontado como elemento relevante para os elevados custos de produção da agricultura irrigada. A baixa oferta de cursos direcionados às técnicas de irrigação, a inexistência de assistência técnica em alguns estados ou sua oferta deficiente em outros

acabam contribuindo para uma utilização ineficiente das técnicas e sistemas de irrigação existentes.

- **Gestão de recursos hídricos:** a agricultura irrigada é atividade altamente intensiva no uso de recursos hídricos. A abordagem de usos múltiplos da água, preconizada na visão estratégica do estudo de planejamento territorial, requer uma atuação integrada dos diversos setores que concorrem pelo seu uso – consumo humano, produção e energia. O adequado tratamento das questões relacionadas ao uso da água em projetos de irrigação, como a obtenção de outorgas e a concorrência com outros usos, exige atenção para atuação convergente dos atores para sua melhor utilização.
- **Crédito e incentivos financeiros para agricultura irrigada:** a inexistência de linhas de crédito adequadas aos prazos de maturação dos projetos da agricultura irrigada. O seguro rural não é adaptado à agricultura irrigada, fazendo-se necessário o desenvolvimento de instrumentos específicos de seguro e crédito.
- **Papel das instituições públicas e privadas no desenvolvimento da agricultura irrigada:** a falta de coordenação entre as instituições, à baixa efetividade de coordenação e a defasagem da legislação relativa ao tema. É necessário coordenar as ações interministeriais e promover uma política mais atrativa aos investimentos privados.
- **Infraestrutura complementar para a agricultura irrigada:** a agricultura irrigada precisa de infraestrutura mínima para se desenvolver. É imprescindível uma logística que permita a produção, o armazenamento e o escoamento da safra das áreas cultivadas, irrigadas ou não. Para tanto, o planejamento territorial em consonância com as ações interministeriais é de extrema importância.

Esses autores ainda identificaram fatores de contexto favoráveis e desfavoráveis que refletem os elementos fora da governabilidade ou abrangência do tema que podem influenciar positiva ou negativamente o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Os fatores de contexto favoráveis foram: (a) demanda por alimentos de maior qualidade; (b) aumento da demanda mundial de alimentos; (c) maior nível de exigência pela preservação ambiental; e (d) agravamento de eventos climáticos extremos em função das mudanças climáticas.

Os fatores de contexto desfavoráveis identificados foram: (a) possibilidade de crise energética; (b) conflitos pelo uso da água; (c) limitação da expansão da capacidade de preservação de água; (d) legislação ambiental restritiva; e (e) custos crescentes de água, energia e outros insumos.

Os principais entraves para o desenvolvimento da agricultura irrigada não podem ser diretamente resolvidos pelo irrigante. Eles dependem muito mais de articulação e integração entre as instituições públicas e entre estas e as instituições privadas. Entre os principais entraves vale a pena destacar: (a) licenciamento ambiental; (b) reservação de água (barragens); (c) outorga do direito de uso de recursos hídricos; e (d) energia elétrica.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF, 2021. 130 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. Brazil's corn industry and the effect on the seasonal pattern of US corn exports. **Economic Research Service (USDA)**, AES-93, 2016.

BARROS, D. S.; CAVALCANTI, A. A. P.; LUCIANO, A. A.; NAVARRO, A. A. de A. L.; BATTISTON, C. C.; ESPÍNDOLA, T. **Relatório final do modelo lógico**: tema: agricultura irrigada. [Brasília, DF]: MPOG/SPIE/NTIH/CGECRH, 2009.

BASTIAANSEN, W. G. M.; STEDUTO, P. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 595-611, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.032>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportações do agronegócio sobem 6% em 12 meses e somam US\$ 102,14 bilhões**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://antigo.agricultura.gov.br/noticias/exportacoes-do-agro-em-12-meses-somam-us-102-14-bilhoes>. Acesso em: 18 maio 2020.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. P.; PILOTTO, I. L.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. S.; SILVA, A.; RODRIGUES, D. C.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; MEDEIROS, G. S.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. A. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014.

EMBRAPA. **Visão 2014-2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira**. Brasília, DF, 2014. 194 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/108955/1/Documento-Visao-versao-completa.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): managing systems at risk**. Rome, 2011. 285 p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337-342, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature10452>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS. **Brazil fact sheet on food and agriculture policy trends**. 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3759e/i3759e.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Piracicaba, 2014.

HIGH LEVEL EXPERT FORUM HOW TO FEED THE WORLD IN 2050, 2009, Rome. **Global agriculture towards 2050...** Rome: FAO, 2015.

IBGE. **Malhas Territoriais**. 2021. Disponível em: www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio. Acesso em: 31 out. 2022.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84-94, 2014.

MARQUES, E. Q.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S.; MATRICARDI, E. A. T.; MEWS, H. A.; COLLI, G. R. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1501–1517, abr. 2020.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; McBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States. **Economic Research Service (USDA)**, v. 154, 2016.

MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; McVICAR, T. R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v. 183, n. 2-3, 301-322, 2005.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H. V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7100-7114, 2014.

PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R. J. 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.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in western Bahia, Brazil: the urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, n. 5, p. 933, maio 2019.

PRADHAN, P.; FISCHER, G.; van VELTHUIZEN, H.; REUSSER, D. E.; KROPP, J. P. Closing yield gaps: how sustainable can we be? **Plos One**, v. 10, n. 6, e0129487, 17 June 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>. Acesso em: 22 nov. 2022.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (ed). **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2017. 327 p.

RODRIGUES, L. N. Quantidade de água utilizada na agricultura irrigada: certezas e incertezas nas estimativas. **Item**, n. 114, p. 47-53, 2017.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: a spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SPANGLER, K. R.; LYNCH, A. H.; SPERA, S. A. Precipitation drivers of cropping frequency in the Brazilian Cerrado: evidence and implications for decision-making. **Weather, Climate, and Society**, v. 9, n. 2, p. 201-213, 2017.

TERRA, M. C. N. S.; SANTOS, R. M.; PRADO JÚNIOR, J. A.; MELLO, J. L.; SCOLFORO, J. R. S.; FONTES, M. A. L.; SCHIAVINI, I.; REIS, A. A.; BUENO, I. T.; MAGNAGO, L. F. S.; STEEGE, H. T. Water availability drives gradients of tree diversity, structure and functional traits in the Atlantic-Cerrado-Caatinga transition, Brazil. **Journal of Plant Ecology**, v. 11, n. 6, p. 803-814, 2018.

ZHANG, Y.; KENDY, E.; QIANG, Y.; CHANGMING, L.; YANJUN, S.; HONGYONG, S. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.

CAPÍTULO 2

O Bioma Cerrado

Níckolas Castro Santana

Lineu Neiva Rodrigues



Fotos: Fabiano Bastos (da esquerda para a direita - 1 e primeiro plano); Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 2, 3 e 4).



Introdução

O bioma Cerrado pode ser dividido em 19 ecorregiões (Figura 1). As ecorregiões são áreas geográficas definidas por padrões ambientais semelhantes, que refletem as características de um ecossistema, especialmente delimitadas a partir de um padrão geomorfológico, vegetação, solos, geologia, diversidade florística, topografia e precipitação (Sano et al., 2019). No Cerrado, a maior ecorregião é a do Paraná Guimarães, com área de 364.523 km², e a menor é a ecorregião costeira, com área de 8.800 km². A ecorregião da Depressão Cárstica do São Francisco é a mais vulnerável, o que ocorre devido à alta conversão do uso do solo e baixo percentual de unidades de conservação (Sano et al., 2019).

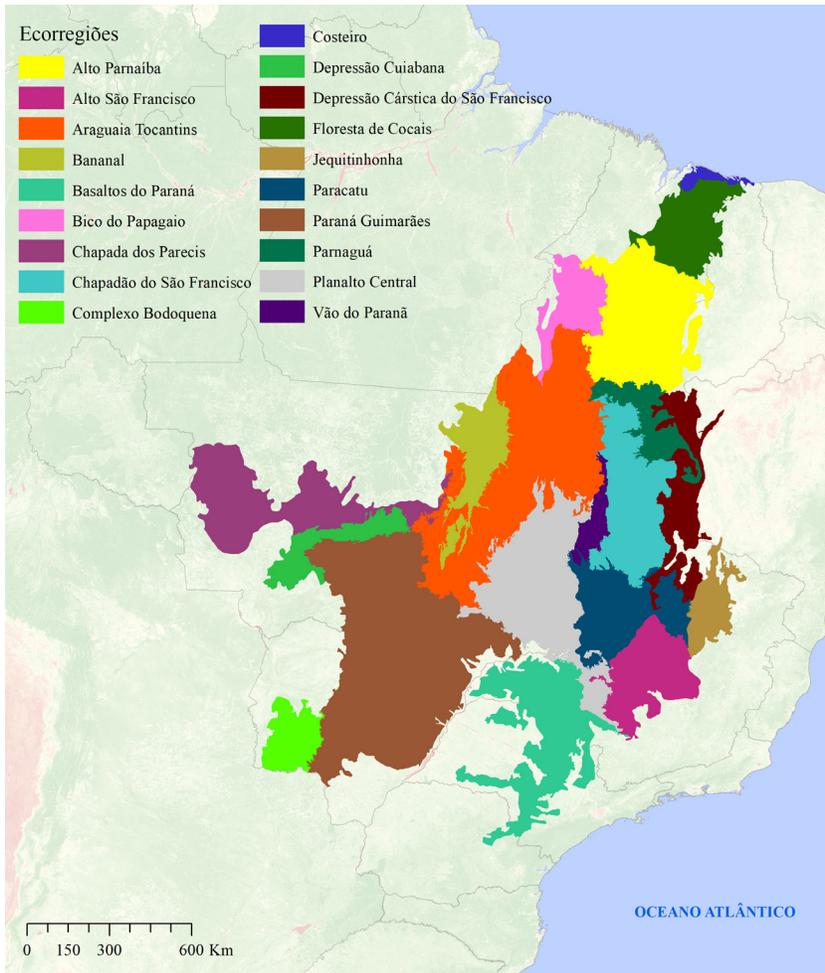


Figura 1. Divisão do bioma Cerrado em ecorregiões. O limite utilizado é diferente da nova atualização dos biomas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Fonte: Adaptado de Sano et al. (2019).

População

Atualmente, mais de 45 milhões de brasileiros residem em municípios estabelecidos no Cerrado, dos quais mais de 20% está concentrada nos municípios-capitais dos estados, enquanto o interior é esparsamente povoado (Figura 2).

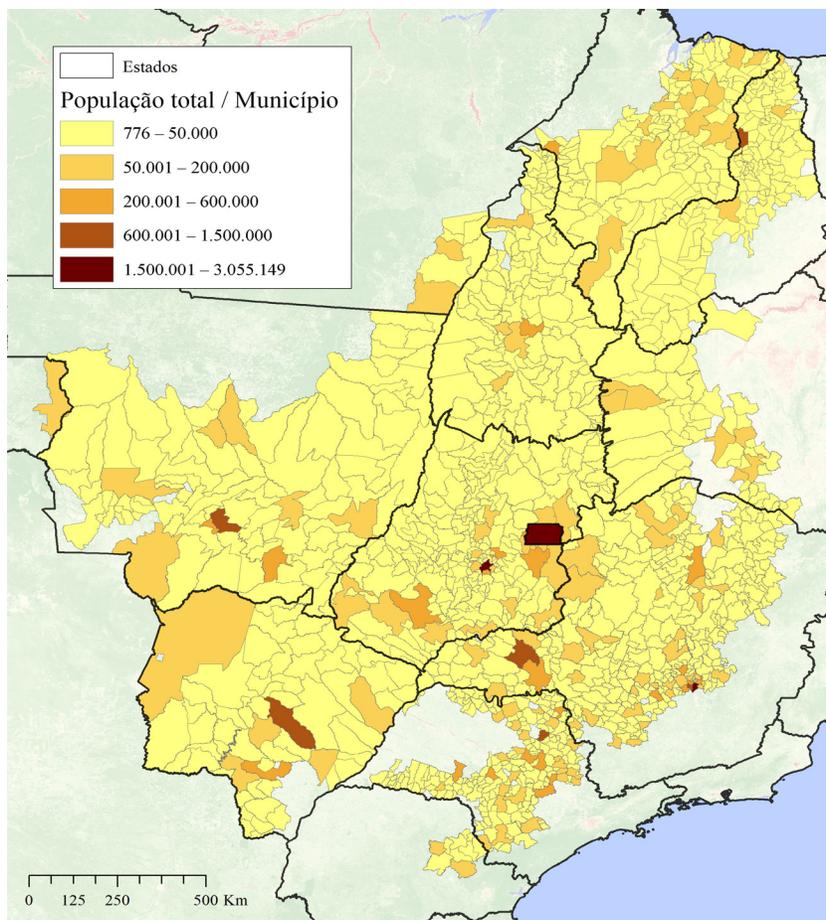


Figura 2. População por município na região do Cerrado para o ano de 2020.

Fonte: IBGE (2020).

O Cerrado cobre totalmente a superfície de 752 municípios, sendo Ribas do Rio Pardo (17.300 km²), localizado no estado do Mato Grosso do Sul, o maior município com área totalmente incluída no Cerrado e o município de Santo Antônio dos Milagres (33 km²), localizado no estado do Piauí, o menor. Outros 682 municípios se encontram em zonas de transição entre a vegetação de Cerrado e de outros biomas, desses o maior é o município de Corumbá (64.400 km²), no estado do Mato Grosso do Sul e o menor o município de Águas de São Pedro (3 km²), localizado no estado de São Paulo.

No ano de 2010, mais de 85% da população do Cerrado estava concentrada em áreas urbanas. Entretanto, alguns municípios não seguem esse padrão. Mais de 85% das populações dos municípios de Muquém do São Francisco, BA, Marajá do Sena, MA, por exemplo, residiam em áreas rurais. Por outro lado, os municípios de Valparaíso de Goiás, GO, Águas de São Pedro, SP, por exemplo, não apresentaram nenhum morador residente em áreas rurais.

Mais de 80% dos municípios do Cerrado possuem a população total variando entre 776 e 50 mil habitantes. Os municípios mais populosos incluem Brasília, DF e Belo Horizonte, MG, com 3.055.149 e 2.521.564 habitantes, respectivamente. Os municípios menos populosos são Serra da Saudade, MG e Borá, SP, com 776 e 838 habitantes, respectivamente.

No Cerrado, os municípios com populações menores do que 50 mil habitantes, em geral, possuem como principal atividade econômica a agropecuária, o que os leva a dependerem mais diretamente dos recursos naturais provenientes desse bioma e das condições climáticas favoráveis a esses processos produtivos. Municípios com populações maiores do que 1,5 milhão de habitantes, como Brasília, Belo Horizonte e Campinas, possuem atividades econômicas diversas, que variam entre os setores agropecuários, industriais e serviços.

Assim como a população brasileira em geral, a população do Cerrado é diversificada quanto à classificação de cor ou raça. A ocupação original por povos indígenas e posteriormente pelos europeus e africanos levou a uma população altamente miscigenada (Figura 3). De fato, cada estado possui um padrão único, por exemplo, no Maranhão mais de 68% da população se declarou parda, enquanto, em São Paulo, esse percentual é menor que 24%.

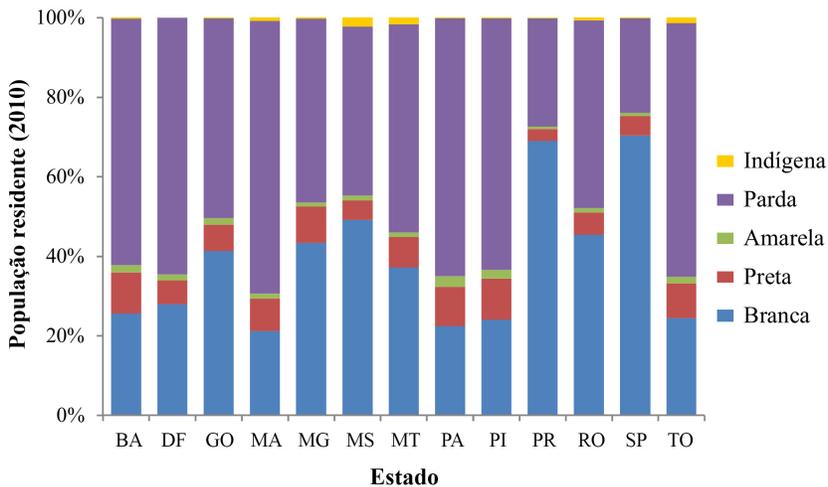


Figura 3. Percentuais da população por estado conforme declaração de cor ou raça no ano de 2010. Os dados são referentes apenas aos municípios inseridos no limite do Cerrado.

Fonte: IBGE (2020).

Além da subdivisão da população entre áreas urbanas e rurais, há a presença de populações tradicionais, dispersas no território do Cerrado. Essas populações podem estar localizadas também em terras indígenas, quilombos e assentamentos da reforma agrária (Figura 4). Até o ano de 2020, foram listadas 102 terras indígenas, 77 quilombos e 1.890 assentamentos da reforma agrária, englobando mais que 8% da área total do Cerrado.

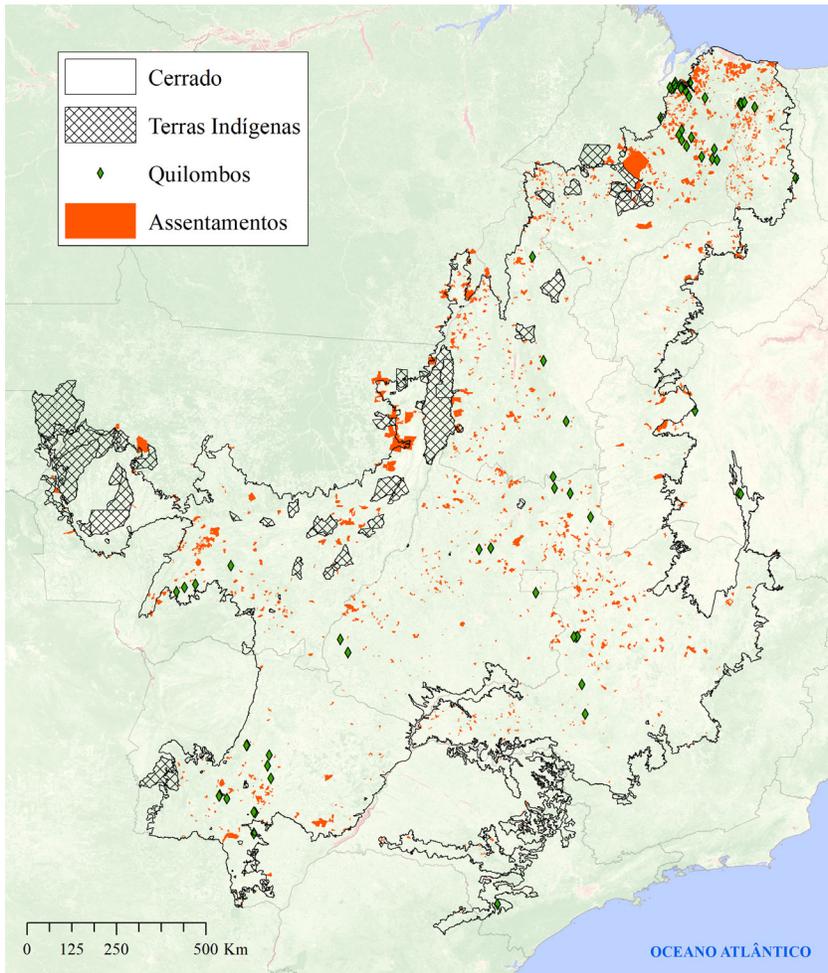


Figura 4. Áreas de populações tradicionais no Cerrado.

Fonte: Adaptado de Funai (2022) e Incra (2022).

Recursos estratégicos do Cerrado

O Cerrado brasileiro dispõe de grande riqueza ecológica ao mesmo tempo em que fornece grande aporte para a economia brasileira. Para a proteção de sua biodiversidade foram implementadas diversas unidades de conservação, totalizando cerca de 8,44% da sua área total (Figura 5).

Cerca de 35% das áreas protegidas, ou 2,6% da área total do Cerrado, são classificadas como unidades de proteção integral, com o objetivo de assegurar a preservação da natureza e minimizar a presença humana, sendo permitidas apenas pesquisas científicas, turismo ecológico e uso indireto dos recursos.

O restante, cerca de 65% das unidades de conservação, estão inseridos no grupo de unidades de conservação de uso sustentável, sendo permitido, nesse caso, o uso sustentável dos recursos naturais. Para o bioma Cerrado essa porcentagem de áreas protegidas, principalmente as áreas de proteção integral, é considerada baixa em comparação à sua área total, colocando em risco a sua conservação no futuro (Klink; Machado, 2005).

O Cerrado desempenha papel importante na economia brasileira, principalmente na produção agrícola e pecuária, na irrigação de lavouras, na geração de energia elétrica e no abastecimento humano/animal, além da mineração.

No setor da agropecuária, foram desenvolvidas diversas técnicas que contribuíram para aumentar a produtividade do Cerrado, tornando o Brasil um dos maiores produtores de alimentos. Grande parte da produção de grãos e cereais é realizada na região, como a soja e o milho (Rada, 2013), que também concentra mais de 55% da produção pecuária do Brasil (Pereira et al., 2018).

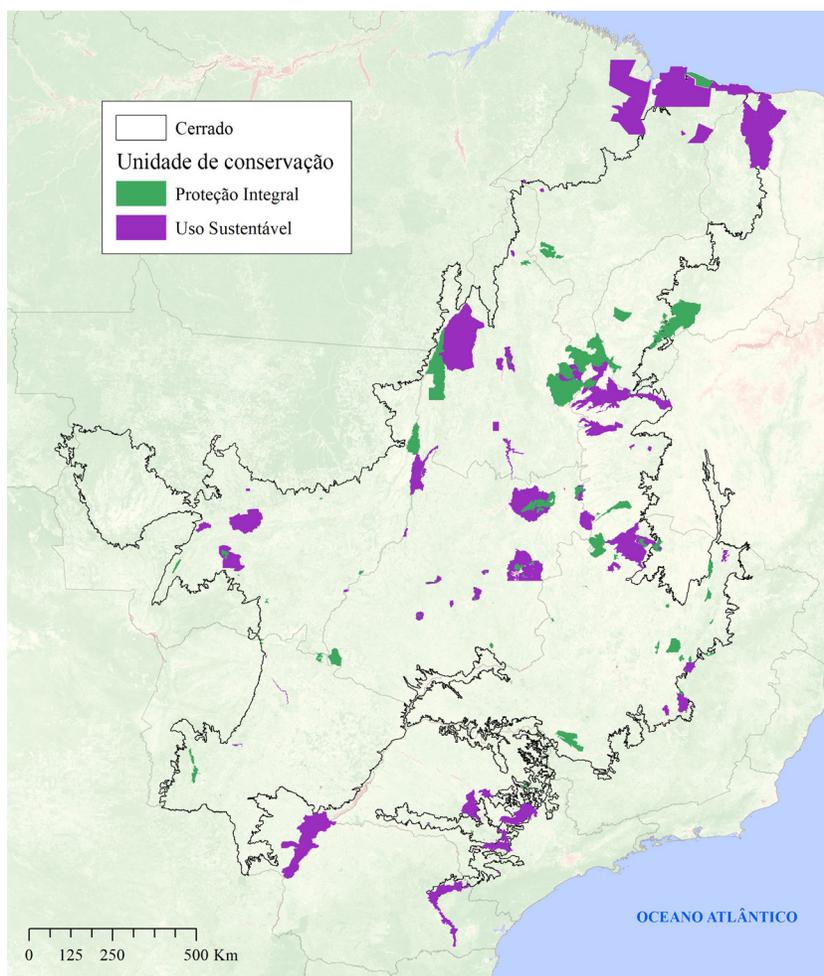


Figura 5. Unidades de conservação do Cerrado.

Fonte: Adaptado de Brasil (2022) e ICMBiO (2022).

De acordo com características ambientais, como o tipo de solo e relevo, cada município se especializou em um tipo de produção agropecuária (Figura 6). Os municípios com maior percentual de sua área composta por pastagens é Jauru (MT) e Aurilândia (GO), com 88% e 74%,

respectivamente. Os municípios de Ipiranga do Norte (MT) e Montividiu (GO) possuem respectivamente 65% e 71% da sua área total cultivada com lavouras de soja, sendo esses municípios os que apresentam o maior percentual de área total ocupada com essa cultura.

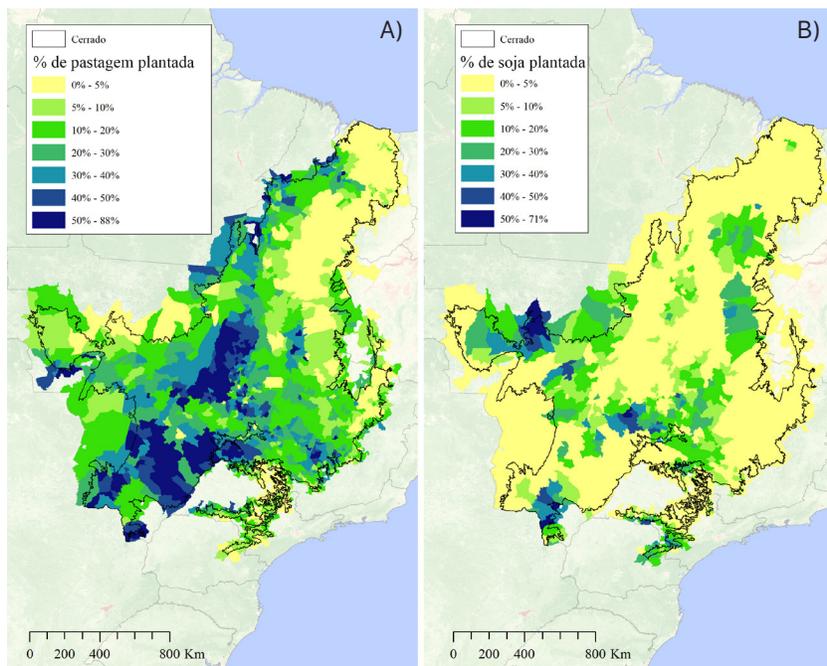


Figura 6. Percentagens de ocupação dos solos municipais: (A) pastagens plantadas; (B) soja.

Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

A geração de energia hidroelétrica no Brasil depende especialmente da disponibilidade hídrica do Cerrado, que possui mais de 291 usinas hidrelétricas (Latrubesse et al., 2019). Além disso, as principais usinas hidrelétricas, tais como Belo Monte, Tucuruí e Itaipu, possuem algumas das suas principais nascentes localizadas nesse bioma (Figura 7). De fato, cerca de 64% da energia elétrica produzida no Brasil é derivada de usinas hidrelétricas (Lima et al., 2020), sendo, 77% provenientes de usinas que contam com nascentes localizadas no bioma Cerrado (Andrade; Santos, 2015; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020).

A usina hidrelétrica de Marimbondo, localizada no Rio Grande, entre São Paulo e Minas Gerais, é a que possui maior potência instalada dentro do limite do Cerrado, com capacidade total de até 1.440 MW. Entre as usinas hidrelétricas localizadas em outros biomas, mas que possuem nascentes no Cerrado, a de Belo Monte, no estado do Pará, é a que apresenta maior capacidade instalada, chegando a 11.233 MW. Atualmente, entretanto, opera efetivamente com 4.500 MW (Fearnside, 2014).

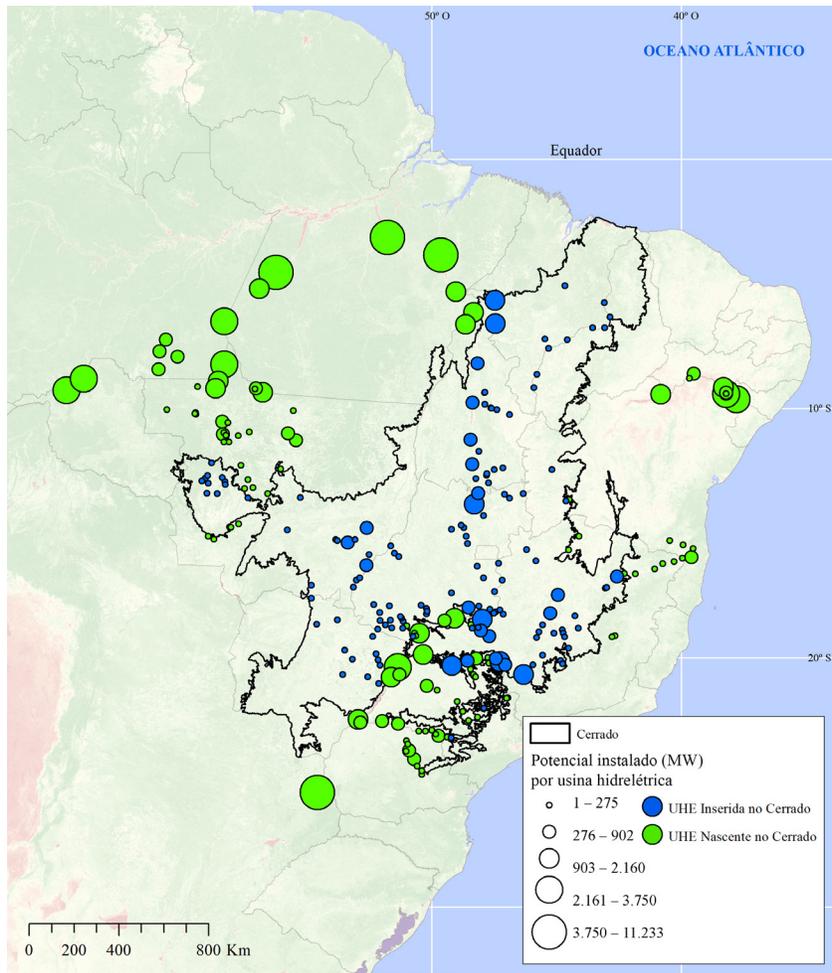


Figura 7. Potencial instalado (MW) em cada usina hidrelétrica, dependente de águas do Cerrado, no ano de 2020, onde também estão incluídas usinas em estágio de planejamento.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2020).

Meio físico

Vegetação

O Cerrado é o maior ecossistema de savana da América do Sul, sendo considerado um dos biomas mais ricos do planeta (Franco et al., 2014). A sua classificação como savana é generalista pois há uma grande diversidade de formações vegetais que variam de florestas ombrófilas e semidecíduais em áreas com maior disponibilidade hídrica; de florestas decíduais em áreas com menor disponibilidade hídrica, mas solos férteis, até a formações típicas de savanas, arbustivas e gramíneas, encontradas em áreas com solos menos férteis e com altas taxas de incêndios (Bueno et al., 2018).

A vegetação do Cerrado é influenciada pela alta variabilidade climática anual, especialmente da precipitação, com períodos de 3 a 6 meses de estiagem. Na Figura 8, é ilustrada a variação da cobertura vegetal a partir da variação mensal do índice de vegetação da diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), calculado a partir de imagens obtidas com um espectroradiômetro de imagem com resolução moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS), para os meses de janeiro a dezembro.

O NDVI é uma fração da resposta da vegetação nos canais espectrais do vermelho e infravermelho próximo, indicando a intensidade da atividade fotossintética em cada pixel das imagens obtidas. A partir do NDVI, é possível analisar a fenologia da vegetação e possíveis distúrbios relacionados, por exemplo, à degradação do solo ou às alterações climáticas (Santos et al., 2021).

O padrão observado na Figura 8 indica o período de crescimento da vegetação do Cerrado, a partir do início do período de chuvas no mês de outubro, enquanto o declínio da vegetação coincide com o início do período de estiagem no mês de maio. Também, é possível observar que

certas áreas do Cerrado têm menor NDVI em comparação com outras, resultado das diferentes fitofisionomias dominantes em cada ecorregião. Na zona costeira ao norte, por exemplo, o NDVI se mantém acima de 0,5 durante todo o ano.

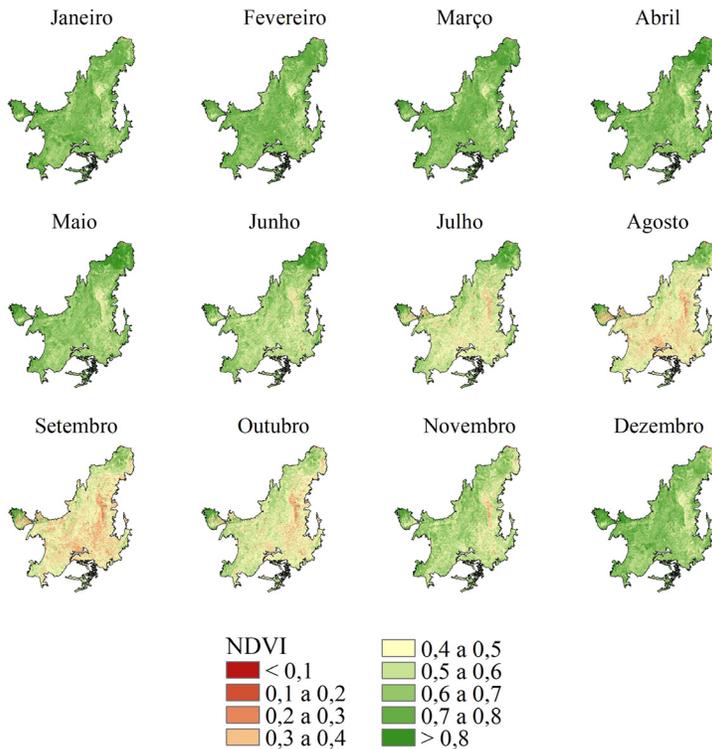


Figura 8. Média mensal do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) no Cerrado, para o período de 2001 a 2019.

Relevo e pedologia

Conforme a classificação geomorfológica do IBGE (2009), o Cerrado pode ser dividido de forma mais abrangente em 7 unidades geomorfológicas ou compartimentos (Figura 9). A maior parte do Cerrado é

definida como depressões, 27% da área total, seguida por planaltos, 22%; patamares, 20%; chapadas, 15%; planícies, 6%; serras, 5%; e tabuleiros, 4%. Essa classificação é baseada nos parâmetros de altimetria, fisionomia, litologia, estrutura, além dos processos originários como, por exemplo, o comportamento da drenagem.

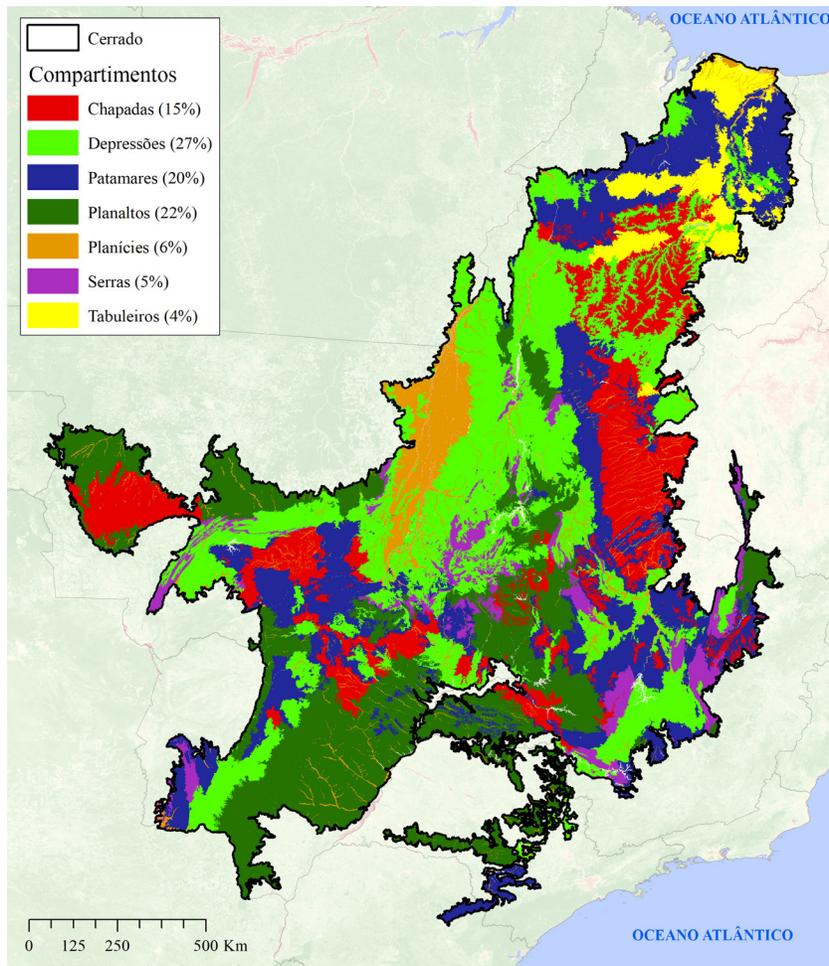


Figura 9. Compartmentação geomorfológica do Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2009).

De forma geral, os compartimentos geomorfológicos podem ser resumidos em dois grandes grupos: platôs e depressões (Sano et al., 2019). Os platôs são as áreas de maior altitude e maior inclinação do terreno, ocupando principalmente a porção centro-sul do bioma. As depressões são áreas com menor altitude e menor inclinação do terreno, ocupando, principalmente, a porção noroeste do bioma. A altitude do Cerrado varia entre 85 m, nas ecorregiões do Bananal e Floresta de Cocais, a 1.045 m na ecorregião do Planalto Central (Sano et al., 2019). A ocupação do Cerrado e sua utilização atual foram dependentes, entre outras variáveis, do padrão geomorfológico. As áreas que mais foram aproveitadas pela agricultura dada a facilidade de implantação de maquinários foram as chapadas e os planaltos, enquanto as outras áreas se especializaram principalmente na pecuária.

A pedologia foi outro fator importante para a ocupação agrícola atual do Cerrado. Os solos mais representativos no Cerrado e os que mais são utilizados na agricultura atual são: os latossolos, ocupando cerca de 43% da área total do bioma; e os neossolos, ocupando cerca de 22% (Figura 10). Os latossolos são solos altamente intemperizados e profundos, com boa drenagem, localizados em áreas de relevo plano a suave-ondulado. Os neossolos podem ser divididos em três subclasses, sendo a mais comum a dos neossolos quartzarênicos, que são profundos, de textura arenosa e bem drenados, ocorrendo em áreas planas ou suave-onduladas (Reatto; Martins, 2005).

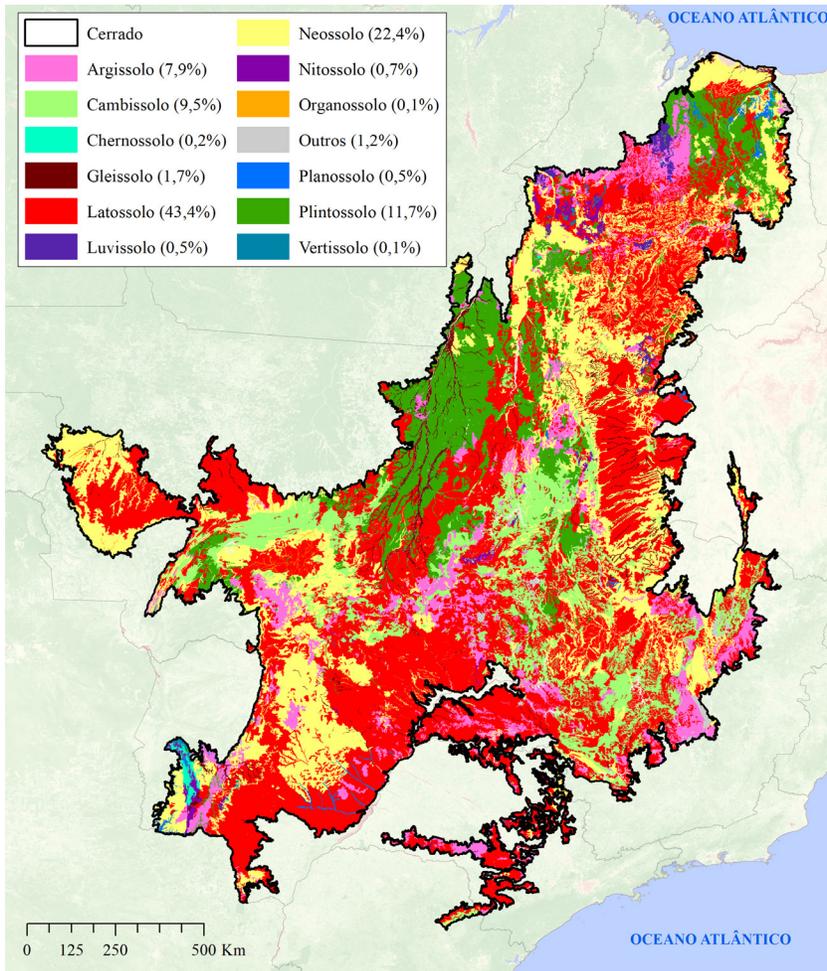


Figura 10. Mapa pedológico do Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Apesar dessas características, a maioria dos solos do Cerrado possui baixa fertilidade natural, dada à alta acidez, ao alto teor de alumínio, a baixas taxas de cálcio e magnésio, sendo necessário aplicar técnicas de correção do solo para se poder viabilizar a produção agrícola.

Desde a década de 1970, a ocupação tem se intensificado, tendo o seu auge na década de 1990 com a aplicação de técnicas desenvolvidas especialmente para aumentar a produtividade e a resistência das culturas (Hunke et al., 2015). A grande dificuldade atual está em se buscar equilibrar o aumento da produtividade com a preservação dos solos, em que se tem observado altas taxas de perdas por erosão em todo o bioma, diminuindo a produtividade ao aumentar a perda de nutrientes (Gomes et al., 2019).

Uso do solo e ocupação do Cerrado

A ocupação do Cerrado brasileiro foi resultado de um conjunto de fatores: características ambientais favoráveis como clima, relevo e solos, além de projetos públicos de ocupação do território. Essa ocupação ocorreu há muitos séculos a partir de populações tradicionais, entretanto se tornou intensiva a partir da década de 1970, principalmente por avanços tecnológicos na agricultura.

Institutos de pesquisa, assim como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) contribuíram com técnicas adequadas de manejo do solo e inovação de maquinários, aumentando a produtividade no bioma. Além disso, o crescimento do setor de serviços e industrial fez surgir grandes centros urbanos no Cerrado, como Brasília e Goiânia (Rocha, 2012).

No ano de 2019, as principais coberturas do Cerrado incluíam cerca de 31% de pastagens, 30% de formações naturais savânicas, 15% de formações naturais florestais, 13% de agricultura e 8% de formações campestres (Figura 11). Os 3% restantes se encontravam divididos entre espelhos d'água, áreas urbanas, silvicultura, mangue e áreas sem vegetação. A ocupação no Cerrado atual atingiu praticamente todos os tipos de formações vegetais, solos e classes geomorfológicas.

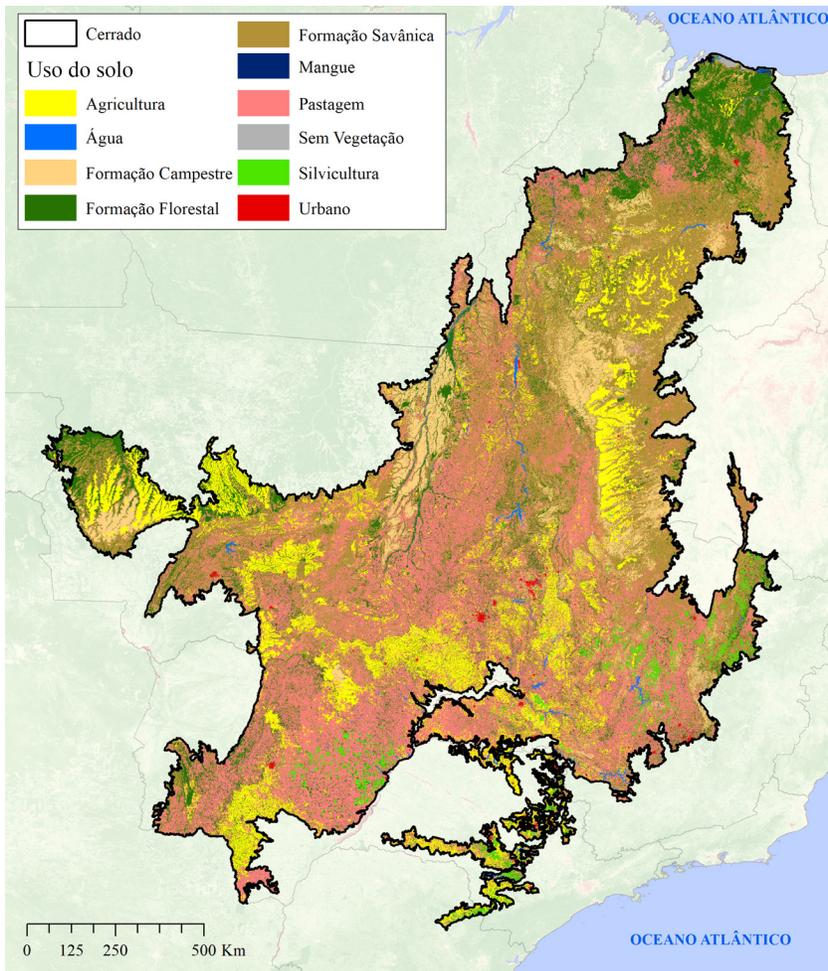


Figura 11. Mapa de uso do solo do Cerrado no ano de 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

Entre os anos de 1989 e 2019, houve uma intensa alteração da cobertura do Cerrado (Figura 12). As classes de silvicultura, urbano e agricultura tiveram os ganhos mais expressivos no período, com mais

de 150% de ganhos de área. As outras classes tiveram aumento menos expressivo.

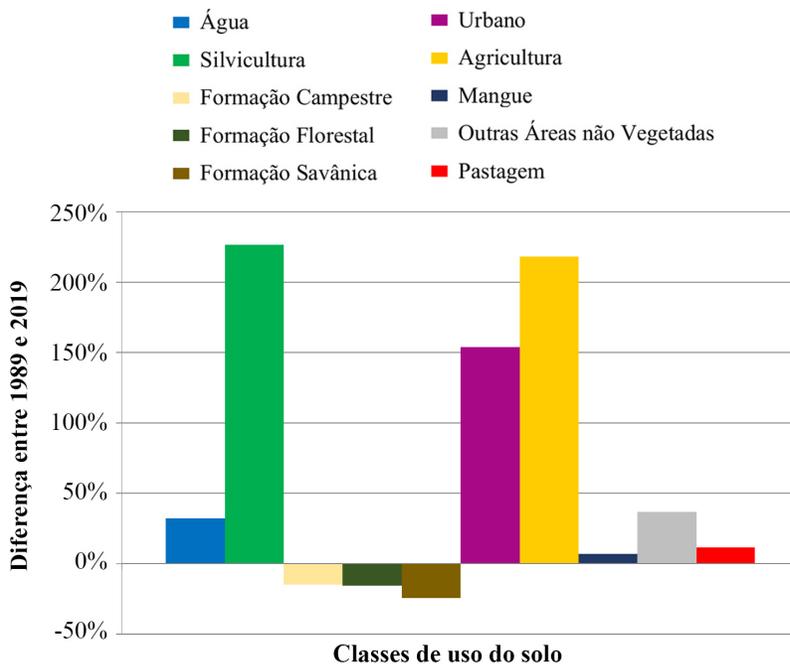


Figura 12. Diferença percentual entre as classes de uso do solo nos anos de 1989 e 2019 no Cerrado.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019).

Nas Figuras 13 e 14, é demonstrado o padrão de alteração da superfície em cada uma das classes de uso do solo. As classes de uso antrópico, silvicultura, agricultura e urbano apresentaram crescimento constante entre o período de 1989 e 2019, enquanto a classe de pastagens apresentou diminuição na última década. As classes de uso naturais, formações campestres, florestais e savânicas apresentaram diminuição constante nas últimas décadas, com exceção das áreas de mangue que estão estabilizadas.

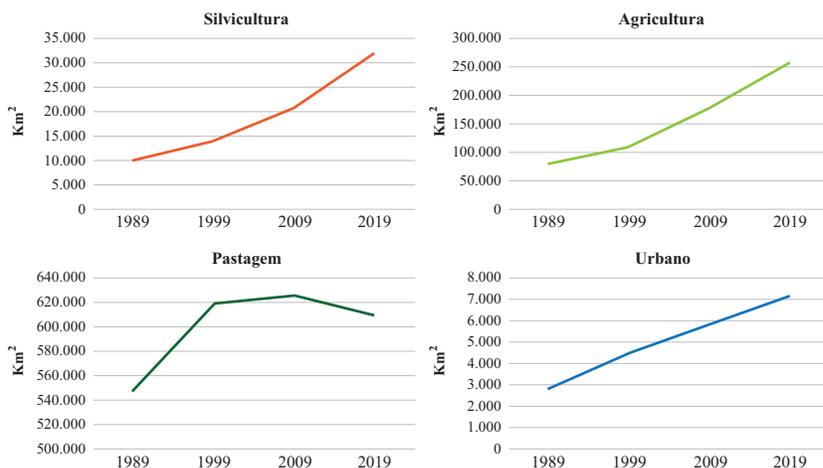


Figura 13. Alteração das classes de uso do solo antrópicas no Cerrado entre os anos de 1989 e 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

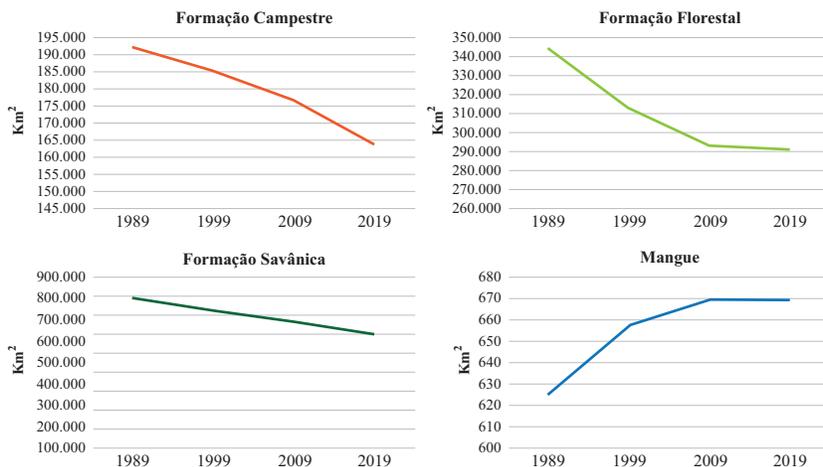


Figura 14. Alteração das classes de uso do solo naturais no Cerrado entre os anos de 1989 e 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019)

A quantificação da fragmentação da paisagem do Cerrado pode ser realizada por métricas da paisagem, as quais podem ser definidas como indicadores quantitativos da estrutura da paisagem, como fragmentação, bordas, formas, área central, vizinhos, diversidade, conectividade, entre outros (Oliveira et al., 2017).

Na Tabela 1, é indicada a situação da vegetação do Cerrado no ano de 2019 a partir dos dados do MapBiomias (MapBiomias, 2019).

Tabela 1. Métricas tradicionais da paisagem natural do Cerrado em quilômetros quadrados para o ano de 2019⁽¹⁾.

Métrica	MPS	NumF	MedF	Área total de vegetação (km ²)
Valor	4,55	231.881	0,29	1.056.160

⁽¹⁾MPS = tamanho médio dos fragmentos; NumF = número de fragmentos; MedF = tamanho mediano dos fragmentos.

Analisando a Tabela 1, observa-se uma área total de vegetação natural de 1.056.160 km² em 2019, sendo dividida em 231.881 fragmentos (NumF). O tamanho médio dos fragmentos foi de 4,55 km² (MPS), enquanto o tamanho mediano foi de 0,29 km² (MedF). Nesse cenário, percebe-se que, para aquele ano, houve grande concentração de pequenos fragmentos de vegetação natural, dado que o tamanho mediano é 0,29 km², indicando assim uma alta fragmentação da paisagem, sendo associada principalmente às áreas de intenso uso agrícola (Carvalho et al., 2009).

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF, 2018. 85 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Portal do SNIRH. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2017)**. Disponível em: www.snirh.gov.br. Acesso em: 24 nov. 2022.
- ANDRADE, A. L.; SANTOS, M. A. Hydroelectric plants environmental viability: strategic environmental assessment application in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1413-1423, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Usinas Hidrelétricas**. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Unidades de Conservação**. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- BUENO, M. L.; DEXTER, K. G.; PENNINGTON, R. T.; PONTARA, V.; NEVES, D. M.; RATTER, J. A.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. de. The environmental triangle of the Cerrado domain: ecological factors driving shifts in tree species composition between forests and savannas. **Journal of Ecology**, v. 106, n. 5, p. 2109-2120, 2018.
- CARVALHO, F. M. V.; DE MARCO, P.; FERREIRA, L. G. The Cerrado into-pieces: habitat fragmentation as a function of landscape use in the savannas of central Brazil. **Biological Conservation**, v. 142, n. 7, p. 1392-1403, 2009.
- FEARNSIDE, P. M. Impacts of Brazil's Madeira River dams: unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. **Environmental Science**, v. 38, p. 164-172, 2014.
- FRANCO, A. C.; ROSSATTO, D. R.; SILVA, L. C. R.; FERREIRA, C. S. Cerrado vegetation and global change: the role of functional types, resource availability and disturbance in regulating plant community responses to rising CO₂ levels and climate warming. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 19-38, 2014.
- FUNAI. **Geoprocessamento e Mapas**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>. Acesso em: 31 out. 2022.
- GOMES, L.; SIMÕES, S. J. C.; NORA, E. L. D.; SOUSA-NETO, E. R. de; FORTI, M. C.; OMETTO, J. P. H. B. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. **Land**, v. 8, n. 1, p. 12, 2019.

- HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRODER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v. 8, p. 1154-1180, 2015.
- IBGE. **Censo Demográfico - 2010**. 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html>. Acesso em: 31 out. 2022.
- IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 out. 2021.
- IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. 182 p. Acompanha CD-ROM. (Manuais técnicos em geociências, 5).
- IBGE. **Pedologia**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>. Acesso em: 31 out. 2022.
- IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio Contínua**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- ICMBIO. **Dados Geoespaciais de Referência da Cartografia Nacional e Dados Temáticos Produzidos no ICMBio: Unidades de Conservação Federais**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- INCRA. **Acervo Fundiário**. 2022. Disponível em: <https://acervofundiario.incra.gov.br/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.
- LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E. Y.; FERREIRA, M. E.; NOGUEIRA, S.; WITTIMANN, F.; DIAS, M. S.; DAGOSTA, F.; BAYER, M. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. **Conservation Science and Practice**, v. 1, e77, 2019.
- LIMA, M. A.; MENDES, L.; MOTHÉ, G.; LINHARES, F.; CASTRO, M. P.; SILVA, M. G. da; STHEL, M. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, 2020.
- MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas**. Coleção [5] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 31 out. 2022.
- OLIVEIRA, S. N. de; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; McMANUS, C. M. Landscape-fragmentation change due to recent agricultural expansion in the Brazilian savanna, Western Bahia, Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 17, n. 2, p. 411-423, 2017.

- PEREIRA, O.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; BAUMGARTEN, L. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018.
- RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v. 38, p. 146-155, 2013.
- REATTO, A.; MARTINS, E. S. Classes de solos em relação aos controles da paisagem do bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 47-59.
- ROCHA, J. C. S. **Dinâmica de ocupação no Bioma Cerrado**: caracterização dos desmatamentos e análise das frentes de expansão. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.
- SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.
- SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MAGISTRALI, I. C.; SILVA, C. G.; OLIVEIRA, C. M. M.; LARANJEIRA, J. P. B.; SILVA, T. P. Degradation of the Brazilian Cerrado: interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118875, fev. 2021.

CAPÍTULO 3

O Clima do Cerrado

Daniel Althoff

Lineu Neiva Rodrigues

Edson Eyji Sano

Giovana Maranhão Bettiol



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 2, 4 e primeiro plano); Fabiano Bastos (da esquerda para a direita - 3).

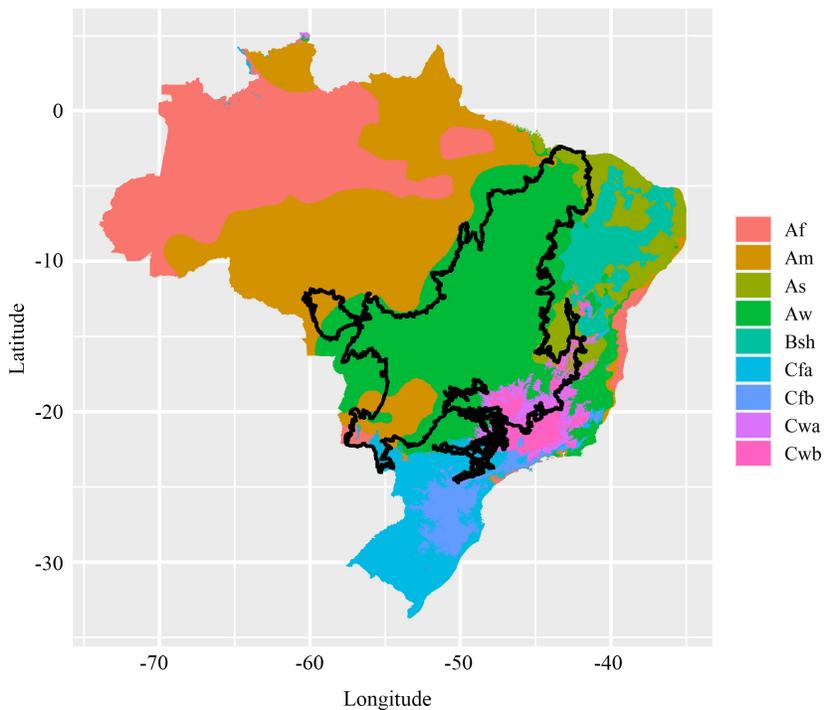
Introdução

De acordo com a classificação climática de Köppen (Köppen, 1936), cerca de 74,6% do bioma Cerrado pode ser classificado como clima tropical de savana e inverno seco (Aw) (Figura 1). Essa classificação climática é caracterizada por apresentar temperatura média acima de 18°C em todos os meses do ano e precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm. Como o próprio nome sugere, a estação seca coincide com o inverno e se estende de maio a setembro. A estação chuvosa se concentra no verão e se estende de outubro a abril.

Além do clima tropical de savana, pode-se observar na região a ocorrência de outros climas. Aproximadamente 9,2% da região apresenta clima tropical subúmido ou de monção (Am), uma transição entre o clima tropical de inverno seco e clima tropical superúmido ou equatorial (Af), quando não há estação seca. Cerca de 0,8% da região apresenta clima equatorial (Af); 3,4%, clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno (Cwb); 5,6%, clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa); 2,4%, clima subtropical com verão quente (Cfa); e 0,3%, clima temperado com verão ameno (Cfb). Nos estados da Bahia, Maranhão e Piauí, há porções do Cerrado, cerca de 3,7%, com clima tropical de verão seco (As) e proximidade com a transição para clima semiárido quente (BSh).

Na Tabela 1, apresentam-se as descrições, as abreviações e os critérios para a classificação climática de Köppen das zonas identificadas no Cerrado.

A sazonalidade e a caracterização do clima são de grande importância para a agricultura irrigada. A concentração das chuvas em poucos meses e a ocorrência de veranicos fazem da irrigação uma tecnologia essencial para a produção agrícola e o desenvolvimento da região.



Af = clima tropical superúmido ou equatorial

Am = clima tropical subúmido ou de monção

As = clima tropical de verão seco

Aw = clima tropical de savana e inverno seco

Bsh = clima semiárido quente

Cfa = clima subtropical com verão quente

Cfb = clima temperado com verão ameno

Cwa = clima subtropical de inverno seco e verão quente

Cwb = clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno

Figura 1. Classificação climática de Köppen.

Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013).

Tabela 1. Critérios de temperatura e precipitação para classificação climática de Köppen dos principais climas do Cerrado.

Temperatura ⁽¹⁾			Precipitação			Clima		
T _{cold}	T _{hot}	T _{ann}	P _m	P _{ann}	Grupo	Tipo	Subtipo	
≥ 18			P _{dry} ≥ 60			f		
			P _{dry} < 60	≥ 25 (100 - P _{dry})	A	m		
				< 25 (100 - P _{dry})		s		
				< 25 (100 - P _{dry})		w		
		≥ 18		≥ 5 P _{lim}	B	S		h
-3 < T _{cold} < 18	≥ 22		P _{dry} > 40			f		a
	< 22 & T _{M10} ≥ 4				C			b
	≥ 22		P _{dry} > 40					a
	< 22 & T _{M10} ≥ 4		P _{wet} ≥ 10 R _{dry}			w		b

⁽¹⁾T_{cold} = temperatura do mês mais frio (°C); T_{hot} = temperatura do mês mais quente (°C); T_{ann} = temperatura média anual (°C); P_m = precipitação mensal (mm); P_{ann} = precipitação anual (mm); P_{dry} = precipitação do mês mais seco (mm); P_{wet} = precipitação do mês mais chuvoso (mm); T_{M10} = número de meses cuja temperatura excede 10 °C; P_{lim} = 2 x T_{ann}; se 70% da P_{ann} ocorrer no verão, então P_{lim} = 2 x T_{ann} + 28; se entre 30 e 70% da P_{ann} ocorrer no verão, P_{lim} = 2 x T_{ann} + 14. Para o hemisfério sul, o verão é considerado o período de seis meses mais quente (outubro a março).

Precipitação

Na região do Cerrado, a precipitação pluvial é a principal fonte de entrada de água e a principal responsável pelas variações no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Além disso, ela é a principal fonte de água para produção agrícola no mundo (Dastane, 1978). A água azul, água disponível nos rios e aquíferos, que é utilizada na irrigação, constitui apenas uma fração da água que é utilizada para satisfazer a demanda hídrica das culturas.

De acordo com Rockström et al. (1999), em média, a quantidade de água verde utilizada no mundo, ou seja, a água proveniente da chuva que é armazenada no solo, nas agriculturas de sequeiro e irrigada é da ordem de 5 mil quilômetros cúbicos por ano. Esse valor representa mais de três vezes a quantidade de água azul utilizada para fins de irrigação (Rost et al., 2008). É importante destacar que a água verde é responsável pela manutenção de todo o ecossistema terrestre não agrícola, com estimativas de uso variando entre 49 mil quilômetros cúbicos por ano e 56,5 mil quilômetros cúbicos por ano (Rockström et al., 1999).

Grande parte da região do Cerrado é carente de dados hidrometeorológicos e de informações técnicas básicas que possam ser utilizadas para estimativas confiáveis da demanda e da oferta hídrica em trechos específicos de uma bacia hidrográfica. Dados de precipitação são ainda mais críticos, em virtude da grande variabilidade espacial das chuvas.

Antes da consolidação e popularização dos sistemas de informações geográficas (SIG) na década de 1990, as informações climáticas do bioma Cerrado eram basicamente provenientes de estações pluviométricas convencionais ou de poucas estações meteorológicas disponíveis. Tais informações são essencialmente pontuais no espaço, isto é, representam apenas uma área em torno de 10 km (ou menos) a 100 km, dependendo do tipo de aplicação ao longo das estações. Além dis-

so, a coleta e o envio desses dados para as bases sempre foram um gargalo.

No Brasil, várias instituições são responsáveis pela coleta e manutenção de dados de precipitação. A base de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), é possivelmente a mais completa disponível. Essa base agrega dados de várias instituições, tais como a do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE-SP), da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa-MG), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), entre outras.

A coleta desses dados de precipitação é tradicionalmente feita por meio de pluviômetros e pluviógrafos instalados em locais estrategicamente definidos. A coleta e o envio desses dados para as bases sempre foram um gargalo. A rede de coleta de dados pluviométricos produz dados pontuais, restritos à área de abrangência das estações. Desde 1990, o número de estações telemétricas tem crescido significativamente, o que tem possibilitado visualizar problemas quase em tempo real.

Atualmente a rede básica que envolve a ANA e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é composta por ~942 estações na região do Cerrado. Na base de dados dessas redes, existem estações com registro histórico de dados desde 1911. Contudo, muitas dessas estações foram descomissionadas ao longo do tempo e a representatividade do banco de dados pluviométricos passou a depender da densidade espacial de suas estações.

Além disso, essas séries de dados apresentam muitas falhas, sendo necessário um intenso trabalho para a organização e consistência das mesmas. Em virtude disto, vem ganhando força o uso de dados prove-

nientes de radares (sensoriamento remoto ativo) a bordo de satélites. Esses dados são especialmente úteis em regiões não monitoradas.

Com o advento do SIG, surgiram os primeiros trabalhos de espacialização de dados climáticos do Cerrado, notadamente dos dados de precipitação, pois tais dados eram muito mais numerosos do que os outros oriundos de estações meteorológicas, como é o caso dos dados de temperatura. O livro denominado *Chuva no Cerrado: análise e espacialização*, editado em 1994, foi a primeira publicação em que a chuva no Cerrado foi caracterizada do ponto de vista espacial. Nessa obra, os dados pontuais de chuva, obtidos a partir de 250 estações pluviométricas com pelo menos 30 anos de observações contínuas, foram espacializados por meio da técnica de interpolação matemática denominada inverso do quadrado da distância.

O primeiro satélite a ser lançado com essa finalidade foi o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), lançado em conjunto pelas agências espaciais dos Estados Unidos (Nasa) e do Japão (Jaxa) (Simpson et al., 1996), que fornece dados diários de precipitação com resolução espacial de $0,25 \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 25 km \times 25 km) de regiões tropicais e subtropicais da Terra desde 1997. No estudo de avaliação da acurácia dos dados do TRMM para o Brasil, conduzido por Pereira et al. (2013), chegou-se a uma concordância de aproximadamente 97% em relação aos dados registrados por 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil.

Com base no sucesso do TRMM, a Nasa, em conjunto com a Jaxa, lançou o satélite sucessor do TRMM, denominado Global Precipitation Measurement (GPM), em 28 de fevereiro de 2014. O GPM adquire dados de precipitação com resolução espacial aproximada de 10 km a cada 30 minutos de intervalo, os quais são processados por meio do algoritmo Global Precipitation Measurement (IMERG). De acordo com Gadelha et al. (2019), que avaliaram o potencial do produto GPM IMERG para estimar precipitação do Brasil por meio de 4.911 pluviômetros distribuídos em todo o território nacional, esses dados conseguem es-

timar chuva com boa acurácia, apesar de uma leve tendência em superestimar precipitação, independentemente da escala temporal (diário, mensal ou anual).

Em 1981, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e a Universidade de Califórnia de Santa Bárbara lançaram o produto denominado Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS). Nesse produto, são disponibilizadas estimativas de precipitação a partir de diversas fontes de informações como, por exemplo, os dados satelitais obtidos na faixa do infravermelho termal, satélites geoestacionários da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e diversas observações de precipitação obtidas por estações meteorológicas (Funk et al., 2015). Os seus dados, agrupados em 1 dia, 5 dias e 30 dias, são disponibilizados com resolução espacial de 0,05°, isto é, em torno de 5 km próximo à linha do equador. Costa et al. (2019) avaliaram a confiabilidade dos dados do CHIRPS para o Brasil por meio da análise de dados de chuva registrados por 183 estações meteorológicas distribuídas em todo o território nacional. Os seguintes coeficientes de determinação foram obtidos para as cinco regiões geográficas: 93% para a região Centro-Oeste; 91% para a região Sul; 93% para a região Norte; 98% para a região Sudeste; e 97% para a região Nordeste. Para todo o Brasil, o coeficiente de determinação foi de 97%.

A precipitação média anual no Cerrado, de acordo com os dados obtidos pelo produto CHIRPS, é de 1.415 mm (Figura 2). A precipitação mínima anual é de 479 mm, concentrada principalmente na porção leste do bioma, na região de transição com o bioma Caatinga, enquanto a precipitação máxima anual é de 2.512 mm, encontrada principalmente na porção oeste do bioma, na região de transição com o bioma Amazônia, além da região litorânea no estado do Maranhão. O Maranhão é praticamente o único estado que apresenta dois padrões nítidos de precipitação, sendo mais chuvoso na porção norte e mais seco na porção sul. Os estados que apresentam maior regime de chuva em termos de média anual são o Mato Grosso e Tocantins, com índices superiores a 1,6 mil milímetro por ano (Figura 3). Por outro lado, os es-

tados que possuem os menores índices de precipitação são a Bahia e o Piauí, com índices inferiores a mil milímetro por ano. As outras sete unidades federativas (Distrito Federal, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e São Paulo) apresentam índices variando de 1,2 mil milímetro a 1,5 mil milímetro por ano.

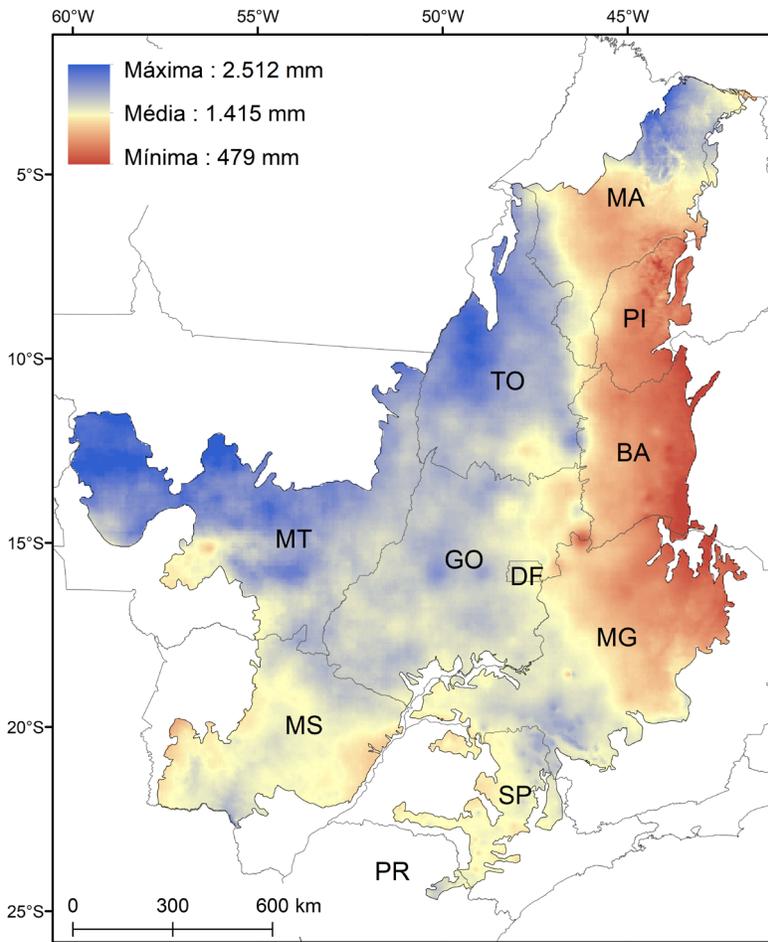


Figura 2. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado (período: 1981–2021).

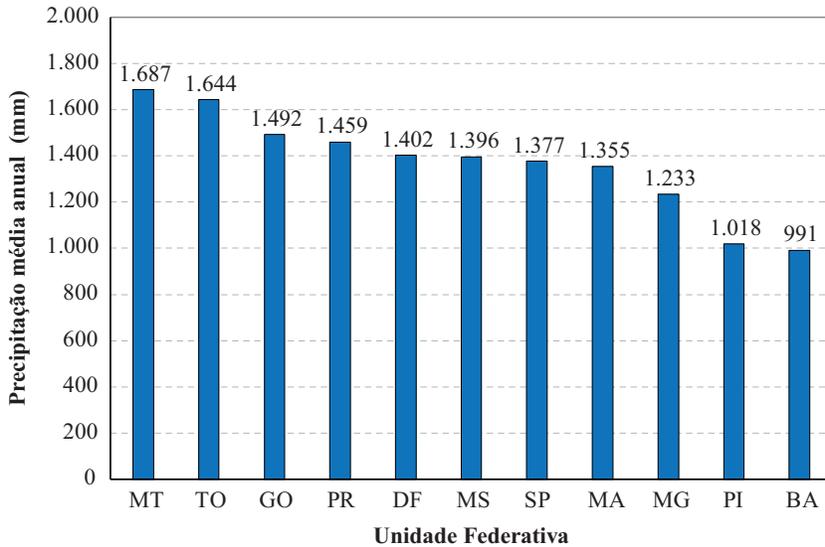


Figura 3. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado, discriminada por unidade federativa (período: 1981–2021).

Na Figura 4, é mostrada a precipitação total anual do bioma Cerrado dividida em quatro décadas: 1981–1990; 1991–2000; 2001–2010; e 2011–2021. Em termos de precipitação média anual, há uma ligeira, porém, consistente tendência de diminuição da precipitação, passando de 1.428 mm na primeira década para 1.397 mm na última década, ou seja, uma redução de 31 mm ao longo das quatro décadas.

A variabilidade das chuvas, representada pelo valor de desvio-padrão (DP) foi maior na primeira década (DP = 166 mm) e menor na última década (DP = 92 mm). O maior índice de precipitação foi verificado em 1985 (1.652 mm), enquanto o menor índice ocorreu em 1990 (1.176 mm). aparentemente não houve interferência perceptível dos efeitos dos fenômenos climáticos regionais conhecidos como El Niño e La Niña nos índices de precipitação no bioma Cerrado, corroborando com os resultados de pesquisas anteriores. O El Niño provoca aqueci-

mento anormal das águas do Oceano Pacífico tropical, enquanto a La Niña está associada ao resfriamento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico. Há um consenso na literatura de que esses dois fenômenos alteram com maior intensidade o regime de chuvas da região Nordeste e Sul do Brasil. No entanto, para a região Centro-Oeste, os seus efeitos são menos proeminentes.

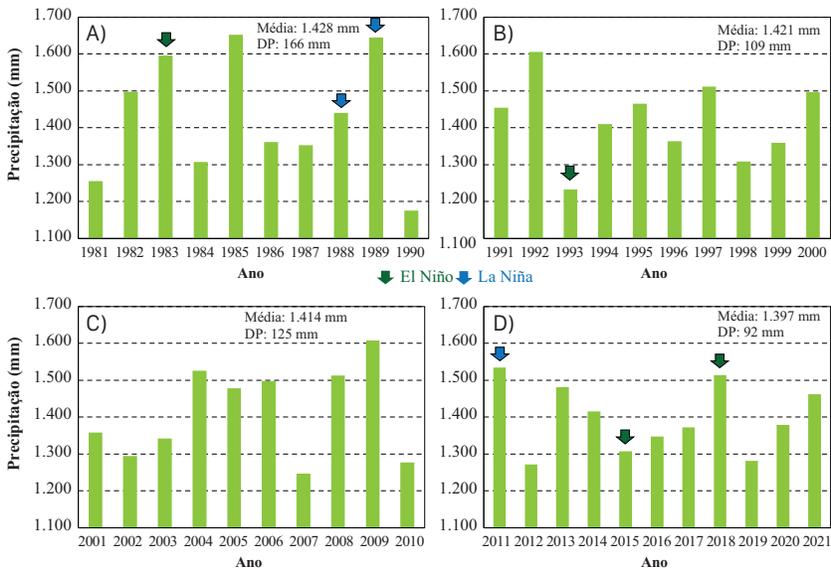


Figura 4. Distribuição anual de chuva no Cerrado nas décadas de 1981–1990 (A), 1991–2000 (B), 2001–2010 (C) e 2011–2021 (D).

Na Figura 5, é apresentada a distribuição mensal de chuvas no bioma Cerrado, com base nos dados do CHIRPS referentes ao período de 1981–2021. É possível notar a existência de três grupos distintos de precipitação: (a) período seco, que corresponde aos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, com precipitação média mensal inferior a 50 mm; (b) período intermediário ou de transição, composto pelos meses de abril e outubro, com precipitação média mensal em torno

de 100 mm; e (c) período chuvoso, que engloba os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, com precipitação média mensal superior a 150 mm.

O padrão de precipitação, observado no boxplot apresentado na Figura 5, é bastante similar ao do estado de Mato Grosso que foi produzido por Oliveira-Filho et al. (2021), utilizando a mesma base de dados disponibilizada pelo projeto CHIRPS. Analisando esta figura, pode-se constatar que há uma incerteza na afirmação, encontrada em diversas publicações, de que existem duas estações climáticas bem definidas no Cerrado, ou seja, 6 meses de seca e 6 meses de chuva. Quais são os 6 meses de chuva? De outubro a março ou de novembro a abril? No Cerrado, o mais correto seria afirmar que, existem de fato duas estações bem definidas: 5 meses de chuva (de novembro a março) e 5 meses de seca (de maio a setembro). Os 2 meses restantes, outubro e abril, correspondem a meses de transição de seca para chuva e de chuva para seca, respectivamente.

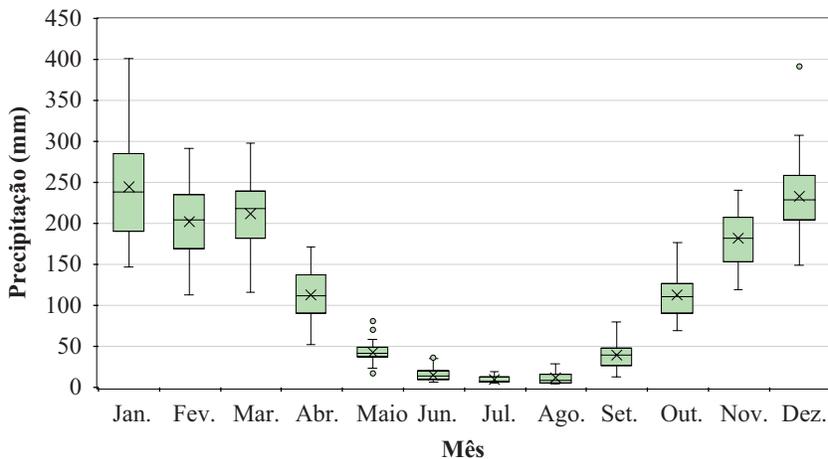


Figura 5. Boxplot de precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

Na Figura 6, é apresentada a distribuição da precipitação média mensal no bioma Cerrado, com base nos dados da plataforma CHIRPS para o período de 1981–2021. Observa-se uma distribuição típica de regiões tropicais, com as maiores intensidades de chuva no verão e as menores no inverno. Mais de 80% da precipitação total anual ocorre no período de outubro a abril. Durante o período chuvoso, os valores mais altos de precipitação são encontrados na porção leste do bioma, notadamente no estado de Mato Grosso e na porção litorânea do estado do Maranhão. Esse regime é influenciado principalmente pelas correntes do Anticiclone do Atlântico Sul (SSA, do inglês *South Atlantic Anticyclone*), um sistema atmosférico de alta pressão que cobre o país no verão, de sudeste para noroeste e também pelo Anticiclone Polar (PA, do inglês *Polar Anticyclone*) durante o inverno. No verão, a circulação do PA em regiões de baixa latitude é limitada pela influência do centro de baixa pressão que se forma na região do Chaco do Paraguai (Baixa do Chaco) (Sano et al., 2007). No litoral maranhense, o clima é influenciado pelas massas de ar Equatorial Atlântica e Equatorial Continental, com predomínio de alta pluviosidade e temperaturas elevadas.

Na maior parte das vezes, a quantidade precipitada durante a estação chuvosa é suficiente para suprir a demanda hídrica de diversas culturas. Por exemplo, a demanda hídrica do ciclo completo da cultura da soja varia de 450 mm a 825 mm; do milho, de 450 mm a 750 mm; do algodão, de 550 mm a 950 mm; e do feijão, 250 mm a 500 mm (Doorenbos; Pruitt, 1977a).

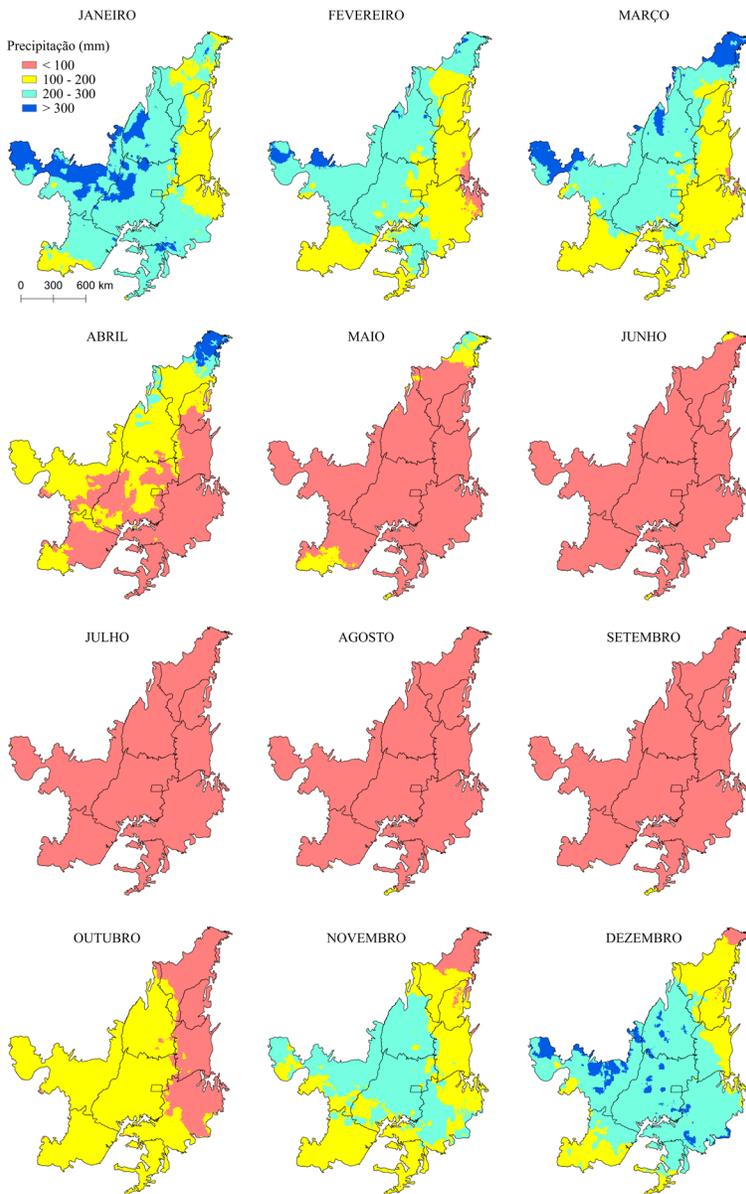


Figura 6. Distribuição espacial da precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

Considerando que há diversos estudos baseados nos dados do GPM na literatura, realizou-se uma análise comparativa entre os dados produzidos pelo GPM e CHIRPS (Figura 7). Para tal, foram utilizadas as precipitações totais anuais do bioma Cerrado no período de 2001 a 2020, que correspondem aos dados GPM que estavam disponíveis em 05 de agosto de 2022. O coeficiente de determinação (R^2) de 0,88 indica que há uma boa correlação entre os dois projetos, com uma tendência de superestimação do GPM em relação ao CHIRPS para valores relativamente mais altos de precipitação (> 1.500 mm). Por outro lado, há uma tendência de subestimação do GPM para valores mais baixos (< 1.250 mm).

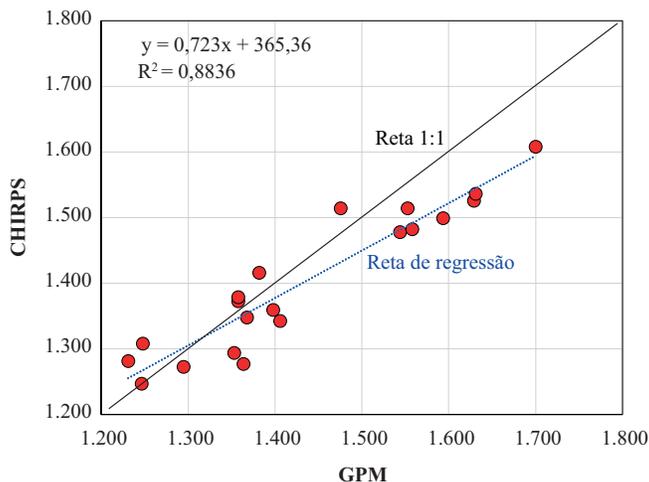


Figura 7. Comparação entre os dados de precipitação total anual (mm) produzidos pelo GPM e CHIRPS para o bioma Cerrado no período 2001–2020.

Na Figura 8A, são apresentados, com base nos dados do GPM, seis locais distintos do Cerrado e suas respectivas precipitações médias mensais. Na Figura 8b, são apresentadas as curvas de permanência no tempo da precipitação mensal baseada na série histórica. Pode-se notar, por exemplo, que a região norte, próxima à divisa entre o Maranhão

e o Piauí (ponto/linha verde-água – região 1), apresenta médias mensais de precipitação inferiores às demais regiões de setembro a dezembro. Contudo, o fim de sua estação chuvosa também é mais tardio que nas demais regiões, apresentando precipitação média mensal superior de abril a maio. O início tardio da estação chuvosa resulta no início tardio da principal safra quando comparado às demais regiões. Nota-se a maior pluviosidade, com precipitação média anual de aproximadamente 1.752 mm, na região do Mato Grosso (ponto/linha laranja – região 2).

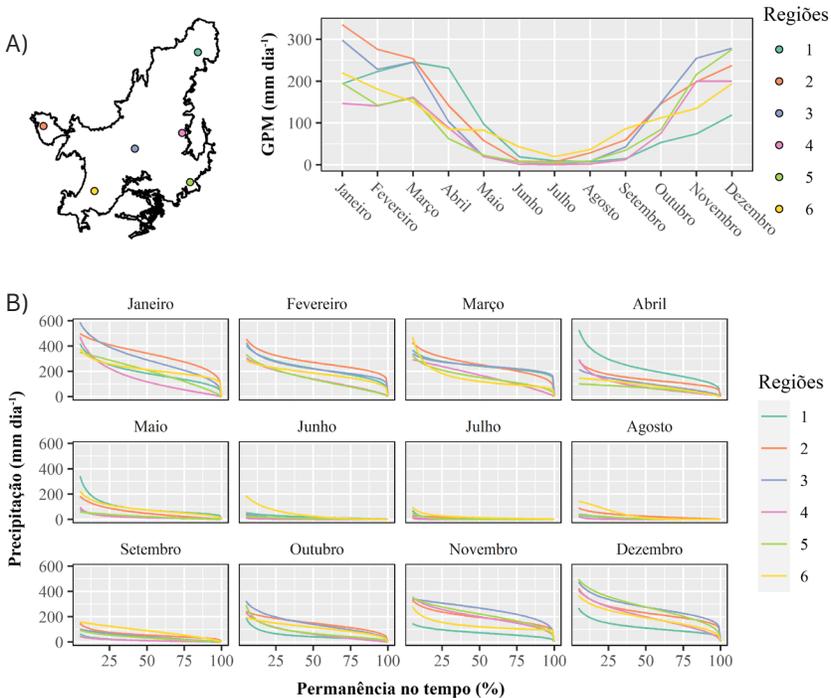


Figura 8. Médias mensais de precipitação e curvas de permanência (função distribuição acumulada) associadas à série histórica mensal de precipitação para seis regiões distintas no Cerrado. Médias mensais (A); e curvas de permanência (B).

Utilizando-se, como critério, os valores das curvas de probabilidades de ocorrência de precipitação, é possível tomar decisões com risco mais baixo. Por exemplo, para o mês de setembro, a região 6 apresenta uma precipitação maior ou igual a 71 mm mês^{-1} em 60% do tempo e maior ou igual a 131 mm mês^{-1} em 20% do tempo. Já a região 4, para o mesmo período, apresenta precipitação maior ou igual a 7 mm mês^{-1} em 60% do tempo e maior ou igual a 22 mm mês^{-1} em 20% do tempo. Assim sendo, a transição da estação seca para a chuvosa é mais tardia para região 4, com expectativa de menor pluviosidade para o mês de setembro (Figura 8B).

Para fins de produção agrícola, entretanto, a forma como a precipitação se distribui ao longo do tempo é tão importante quanto a quantidade precipitada, isto é, o ideal para a produção agrícola é que a precipitação seja mais bem distribuída no tempo e menos concentrada. Outro aspecto a ser destacado é que o importante para a cultura é a precipitação efetiva, ou seja, aquela precipitação que fica armazenada na zona do sistema radicular da cultura disponível para evapotranspiração. A quantidade de chuva que será retida na forma de precipitação efetiva dependerá, entre outras coisas, das características da precipitação, do tipo de solo e da profundidade do sistema radicular da cultura.

Assim, para fins de planejamento de irrigação, é importante avaliar a frequência de ocorrência de dias sem chuva. O Cerrado apresenta elevada frequência de dias sem chuva de maio a setembro (Figura 9), caracterizado por sua estação seca. Mesmo em períodos na estação chuvosa, como de novembro a março, observa-se a ocorrência de veranicos. Em janeiro, por exemplo, em média, 48,1% do Cerrado apresenta ocorrências de 8 a 12 dias sem chuvas, enquanto 41,8% do bioma apresenta mais de 12 dias sem chuva. Já em abril, mais de 94% do Cerrado apresenta uma média de mais de 12 dias sem chuva.

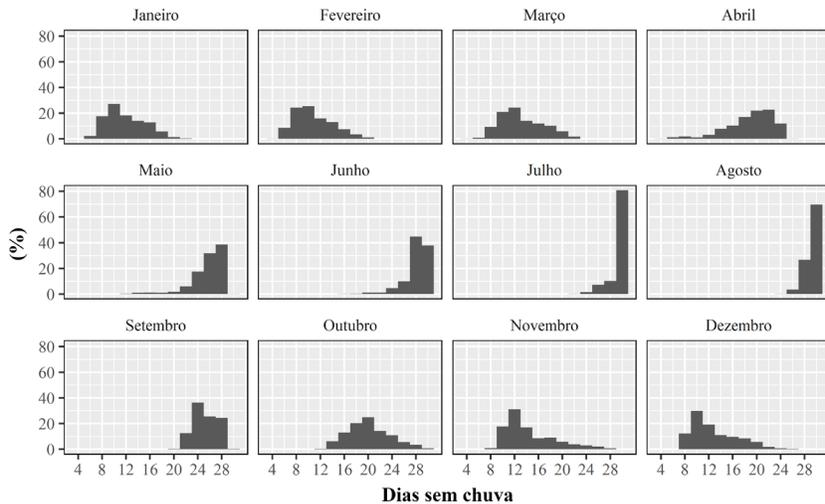


Figura 9. Distribuição da ocorrência de média de dias sem chuva mensalmente para todo o Cerrado.

É importante avaliar a distribuição espacial da média de dias sem chuva ao longo do Cerrado. Por exemplo, o estado do Mato Grosso apresenta, em geral, menos de 12 dias sem chuva de novembro a fevereiro (Figura 10). Já o Oeste Baiano apresenta maior número de dias sem chuva. Mesmo no período mais chuvoso, de novembro a março, a proporção da região que apresenta menos de 15 dias sem chuvas mensalmente varia de 22% a 57%. Já o período de maio a setembro configura, para quase todo o Cerrado, um período de grande risco com baixa ocorrência de chuvas e baixo volume precipitado.

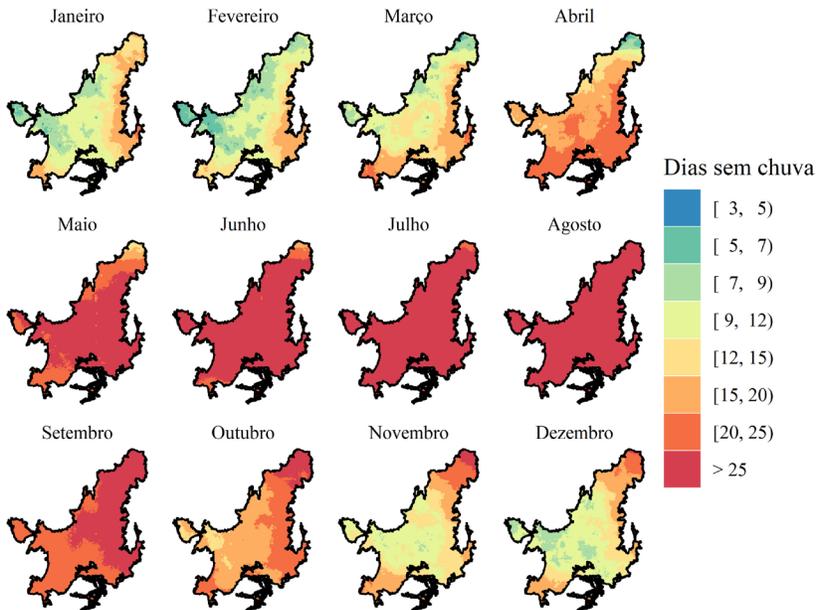


Figura 10. Número médio de dias sem chuva em cada mês do ano para o Cerrado.

Evapotranspiração

Se não for bem planejado, o crescimento da irrigação no Cerrado pode implicar no surgimento e no aumento das disputas pelo uso de água nas bacias hidrográficas, especialmente nas que já possuem disponibilidade hídrica reduzida. Por isso, é importante desenvolver estratégias para reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais para os diversos usos. As estratégias adotadas devem ser efetivas para aumentar a eficiência de todos os usos, principalmente da irrigação, a principal usuária.

Qualquer estratégia de melhoria da eficiência da irrigação deve priorizar o ajuste do manejo, com base em um adequado entendimento do comportamento da evapotranspiração da cultura (ETc). A ETc é a transferência de água (na forma de vapor) do sistema solo-planta

para a atmosfera e depende da energia disponível para a evaporação (Reichardt, 1985). A transferência de água do solo para a atmosfera é chamada de evaporação (E) e da planta para a atmosfera é chamada de transpiração (T). Embora sejam processos fisicamente similares, há diferenças importantes entre a evaporação da água do solo e a transpiração. A resistência à difusão de vapor de água é maior nas folhas do que na água livre, mesmo com a abertura estomática total (Chang, 1968).

Existem vários métodos descritos na literatura que podem ser utilizados para a estimativa da ET_c , tais como: tanques de evaporação, lisímetros, covariância de vórtice turbulento, modelos de superfície da terra (LSMs), modelagem de balanço de água superficial e métodos de balanço de água do solo (Wang et al., 2015). A utilização de sensoriamento remoto para estimativa da ET_c vem ganhando espaço nos estudos relacionados ao manejo de irrigação em grandes áreas. Algoritmos que utilizam dados de sensoriamento remoto são utilizados em estudos de irrigação e relacionados à gestão de recursos hídricos, auxiliando estabelecer relações entre uso do solo e uso da água para o planejamento de bacias hidrográficas, modelagem hidrológica, desempenho da irrigação, condições de monitoramento da degradação da vegetação nativa, entre outros (Bastiaanssen et al., 2005).

Entre os modelos existentes, aquele proposto por Doorenbos e Pruitt (1977b), que calcula a evapotranspiração potencial da cultura por meio da relação entre a evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) e um coeficiente de cultura (K_c), é o mais utilizado por sua simplicidade e facilidade de programação e operacionalização. A ET_o , por sua vez, é a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência, sendo, no Brasil, mais comumente utilizada a grama batatais (*Paspalum Notatum* L.). A ET_o representa a demanda atmosférica e varia de acordo com a localidade. Já o K_c varia de acordo com a cultura, seu estágio de desenvolvimento e o clima. A equação Penman-Monteith (Allen et al., 1998) é utilizada como referência para o cálculo da ET_o , incorporando parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos.

No Brasil, a principal instituição responsável pela coleta e disponibilização de dados meteorológicos é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Atualmente, a base de dados do INMET conta com cerca de 277 estações convencionais e 595 estações automáticas, sendo algumas já descomissionadas. Os dados de estações convencionais estão disponíveis desde 1905, e o número de estações automáticas aumentou significativamente a partir de 2006 (Althoff et al., 2020a).

Diante do expressivo crescimento da agricultura irrigada no Cerrado brasileiro, é fundamental melhorar as estimativas da precipitação e da evapotranspiração de referência. Para tal, existem diversas bases de dados, com diferentes resoluções temporais e espaciais (Abatzoglou et al., 2018; Althoff et al., 2020b; Xavier et al., 2016), que podem ser utilizadas para essa finalidade.

O ETo-Brazil (Althoff et al., 2020b) é uma das bases de dados de ETo disponível para todo o território brasileiro. Essa base de dados foi derivada de dados ETo calculados para estações meteorológicas e especializados por meio de algoritmos de inteligência artificial e com o auxílio de dados de climatologia e satélite. Esse produto fornece a ETo, independentemente da existência de estações meteorológicas, para qualquer região do Brasil e com resolução temporal em base diária e espacial de $0,10^\circ \times 0,10^\circ$ (aproximadamente 10 km x 10 km). Para que seja efetivo ao longo do tempo, entretanto, é necessário que esse produto seja constantemente atualizado.

A ETo total média anual do Cerrado varia entre 1.080 mm, na região de transição entre Cerrado e Mata Atlântica, no estado de São Paulo, e 1.905 mm no Piauí. Na Figura 11, são apresentadas as médias mensais de ETo para todo o Cerrado. Pode-se observar que o período de maior demanda hídrica ocorre de agosto a novembro, em especial no leste e no norte do Cerrado, no estado da Bahia, Maranhão e Piauí. Em outubro, por exemplo, a ETo varia de $3,4 \text{ mm dia}^{-1}$ a $6,7 \text{ mm dia}^{-1}$, com mais de 50% do Cerrado apresentando valores entre $4,6 \text{ mm dia}^{-1}$ e $5,1 \text{ mm dia}^{-1}$.

As elevadas demandas de agosto a setembro são particularmente críticas, pois representam um período de transição entre a estação seca e a estação chuvosa, quando as precipitações são irregulares.

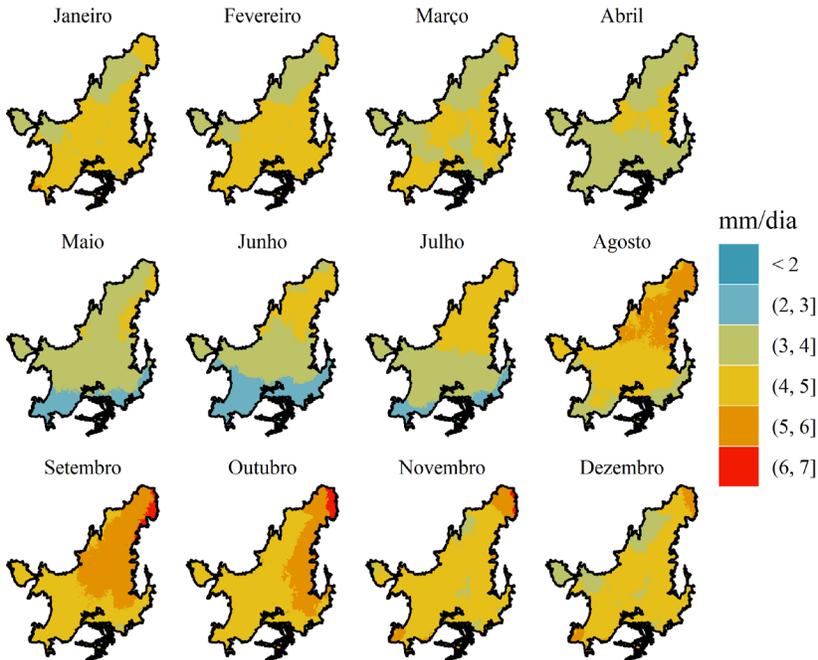


Figura 11. Evapotranspiração de referência média mensal para o Cerrado. Período de referência: junho de 2000 a dezembro de 2019 produto.

Em termos de volume de água demandado, o Oeste Baiano, por exemplo, apresenta uma demanda média de E_{To} entre 5 mm e 6 mm dia^{-1} , no mês de outubro, o que representaria um total de 5 mil metros cúbicos a 6 mil metros cúbicos por dia para uma área irrigada de cem hectares. Já para o Mato Grosso do Sul, no mês de maio, a demanda pela E_{To} ficaria entre 2 mm dia^{-1} a 3 mm dia^{-1} e, portanto, 2 mil metros cúbicos a 3 mil metros cúbicos por dia para os mesmos cem hectares.

Na Figura 12a, apresenta-se a ETo média mensal, como exemplo, para seis regiões distintas, enquanto, na Figura 12b apresenta-se as curvas de permanência da ETo no tempo baseada na série histórica. Pode-se notar, por exemplo, que a região do Oeste Baiano (ponto/linha rosa – região 4) apresenta médias mensais de ETo superiores ao da região do Mato Grosso (ponto/linha laranja – região 2), principalmente no período da principal safra, de outubro a março. Além disso, a região do Mato Grosso é caracterizada por maior pluviosidade, o que pode indicar maiores chances de sucesso da agricultura de sequeiro quando comparado com as demais regiões consideradas.

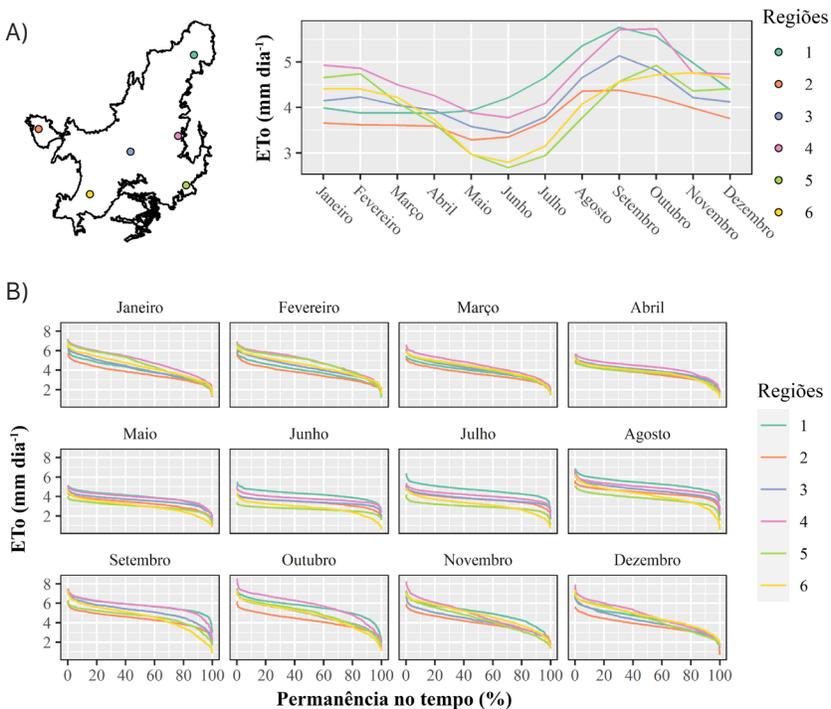


Figura 12. Médias mensais de evapotranspiração de referência (ETo) (A); e curvas de permanência associadas à série histórica diária de ETo para seis regiões distintas no Cerrado (B).

Uma estratégia interessante de ser adotada é a de se trabalhar com a probabilidade de ocorrência de evapotranspiração. Por exemplo, para o mês de dezembro, a região 2 apresenta uma ETo maior ou igual a $\sim 3,6 \text{ mm dia}^{-1}$, em 60% do tempo, e maior ou igual a $\sim 4,4 \text{ m dia}^{-1}$, em 20% do tempo. Já a região 5, para o mesmo período, apresenta ETo maior ou igual a $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$, em 60% do tempo, e maior ou igual a $5,8 \text{ mm dia}^{-1}$, em 20% do tempo. Logo, não só é maior a ETo para a região 5, no mês de dezembro, como também o é a sua variabilidade (maior inclinação da linha verde em relação à linha laranja – região 5 em relação à região 2, dezembro, conforme ilustra a Figura 12b). Por outro lado, a região 2 apresenta maior ETo média de maio a agosto, estação seca, o que indica maior demanda hídrica para culturas irrigadas neste período.

A sazonalidade da demanda atmosférica, combinada com a sazonalidade das precipitações, é um fator determinante para épocas de semeadura e viabilidade da dupla safra em algumas regiões do Cerrado. Na Figura 13, apresenta-se o índice de aridez mensal para o Cerrado, calculado com base na evapotranspiração de referência do banco de dados do ETo-Brazil e nas estimativas de precipitação provenientes do IMERG. Valores de índice de aridez menores que um indicam que a ETo mensal acumulada é menor que a precipitação mensal acumulada. Entretanto, é importante ressaltar que o índice de aridez menor que um não indica necessariamente que toda a precipitação foi aproveitada pela cultura. Esse índice indica as regiões que podem sofrer escassez de água verde. Além disso, ele oferece uma indicação de regiões onde a agricultura irrigada pode se desenvolver com uma menor necessidade de irrigação complementar.

Os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, por exemplo, na região oeste do Cerrado, apresentam índices de aridez inferiores a um em diversos meses do ano e o período comum para o plantio de soja é entre o fim de setembro e início de outubro. Já para o estado da Bahia, na região leste do Cerrado, é mais comum o plantio de soja entre ou-

tubro e novembro. E para os estados do Maranhão e Piauí, ao norte do Cerrado, o período de plantio preferencial é ainda mais tardio, entre novembro e dezembro.

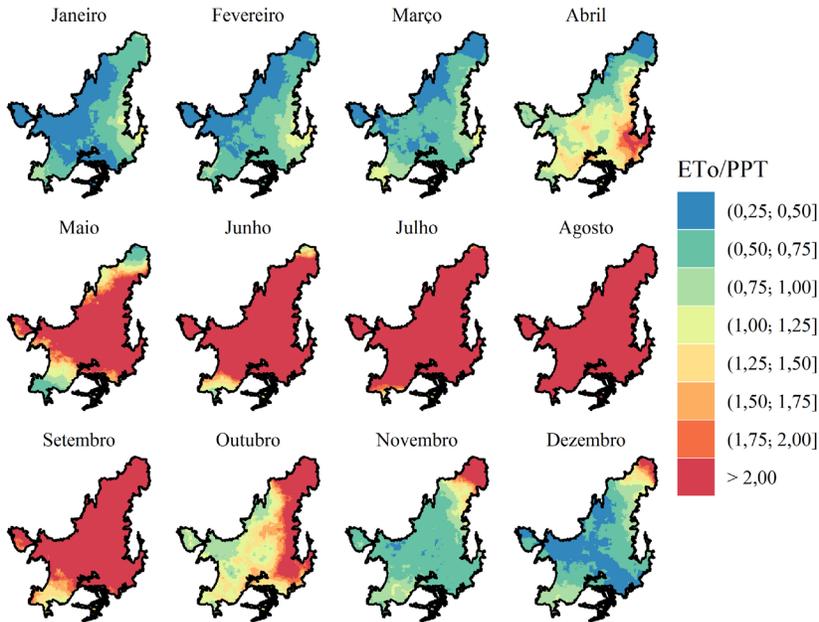


Figura 13. Índice de aridez mensal para o Cerrado baseado nos dados de evapotranspiração de referência do ETo-Brazil e estimativas de precipitação de satélite do IMERG.

Na Figura 14, foram destacadas as mesmas seis regiões distintas e o índice de aridez mensal correspondente a cada uma. É possível observar que o eixo Y (aridez) foi limitado a 2,0, devido ao fato que para precipitações próximas a zero, o índice tende a infinito. Índices de aridez elevados indicam condições similares relacionados à restrição da evapotranspiração devido à limitação hídrica frente à oferta de energia. As regiões 2 e 6 (pontos/linhas laranja e amarelo) apresentam período mais curto, em que o índice de aridez é maior do que 2,0. Em ge-

ral, essas regiões apresentam maior pluviosidade e estação seca mais curta. Já as regiões 1 e 4 (pontos/linhas verde-água e rosa) têm maior período com índice de aridez maior que 2,0. Essas regiões são caracterizadas por elevadas taxas de ETo na maior parte do ano.

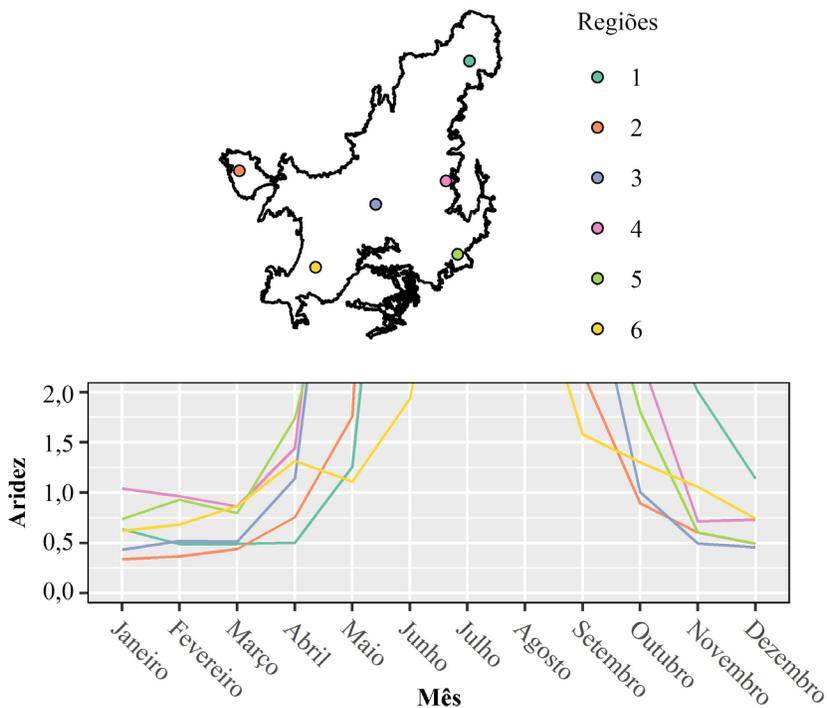


Figura 14. Índice de aridez mensal para seis regiões distintas do Cerrado.

Referências

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 170191, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **FAO Irrigation and drainage paper 56: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil - Repository. **Mendeley Data**, v. 3, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.17632/sstjw74ryh.3>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. ETo-Brazil: a daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil (2000–2018). **Water Resources Research**, v. 56, n. 7, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020WR027562>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL. Model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)). Acesso em: 20 jul. 2020.
- CHANG, J.-H. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine Publishing, 1968.
- COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para todo o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 228-243, 2019.
- DASTANE, N. G. **FAO Irrigation and drainage paper 25: effective rainfall in irrigated agriculture**. Rome: FAO, 1978.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **FAO Irrigation and drainage paper 24: Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977a.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Roma, Italy: FAO, 1977b.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015.

GADELHA, A. N.; COELHO, V. H. R.; XAVIER, A. C.; BARBOSA, L. R.; MELO, D. C. D.; XUAN, Y.; HUFFMAN, G. J.; PETERSEN, W. A.; ALMEIDA, C. N. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. **Atmospheric Research**, v. 218, p. 231-244, 2019.

GADELHA, A. N.; COELHO, V. H. R.; XAVIER, A. C.; BARBOSA, L. R.; MELO, D. C. D.; XUAN, Y.; HUFFMAN, G. J.; PETERSEN, W. A.; ALMEIDA, C. das N. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. **Atmospheric Research**, v. 218, p. 231-244, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.001>. Acesso em: 20 jul. 2020.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; BRAITHWAITE, D.; HSU, K.; JOYCE, R.; KIDD, C.; NELKIN, E. J.; SOROOSHIAN, S.; TAN, J.; XIE, P. **Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG): algorithm theoretical basis document**. [S. l.]: National Aeronautics and Space Administration, 2019. Disponível em: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG_ATBD_V06.pdf. Acesso em: 20 out. 2020.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. In: HANDBUCH der klimatologie. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. v. 1, part C., p. 1-44.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SILVA JÚNIOR, C. A.; TEODORO, P. E.; ROSSI, F. S.; BLANCO, C. J. C.; LIMA, M.; GOIS, G.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. B.; VANDERLEY, M. H. G. S. Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 9, p. 4478-4493, 2021.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985.

ROCKSTRÖM, J.; GORDON, L.; FOLKE, C.; FALKENMARK, M.; ENGWALL, M. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. **Conservation Ecology**, v. 3, n. 2, 1999. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26271715>. Acesso em: 30 mar. 2021.

ROST, S.; GERTEN, D.; BONDEAU, A.; LUCHT, W.; ROHWER, J.; SCHAPHOFF, S. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. **Water Resources Research**, v. 44, n. 9, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007WR006331>. Acesso em: 30 mar. 2021.

SILVA, F. A. M. da; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. cap. 3, p. 71-88.

SIMPSON, J.; KUMMEROW, C.; TAO, W. K.; ADLER, R. F. On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 60, p. 19-36, 1996.

WANG, S.; PAN, M.; MU, Q.; SHI, X.; MAO, J.; BRÜMMER, C.; JASSAL, R. S.; KRISHNAN, P.; LI, J.; BLACK, T. A. Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 4, p. 1540–1560, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0189.1>. Acesso em: 30 mar. 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>. Acesso em: 30 mar. 2021.

CAPÍTULO 4

Recursos Hídricos Superficiais no Cerrado

Daniel Althoff

Lineu Neiva Rodrigues



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 2, 3 e 4); Fabiano Bastos (primeiro plano).



Introdução

Os recursos hídricos são renováveis, mas são limitados no espaço e no tempo, podendo não serem suficientes para atender às demandas de todos os usuários. Portanto, o uso dos recursos hídricos disponíveis deve ser planejado e harmonizado entre os diferentes usuários.

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 por questões relacionadas à baixa disponibilidade hídrica, quanto por 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 (Agência Nacional de Águas, 2014).

Atualmente, em razão da falta de planejamento intersetorial de longo prazo e do desenvolvimento acelerado e muitas vezes não planejado das diversas atividades econômicas, são encontradas áreas no país que também começam a apresentar os primeiros conflitos intra-setoriais e intersetoriais em torno da demanda e da oferta de recursos naturais, dentre eles a água (Agência Nacional de Águas, 2014). Esse é o caso, por exemplo, de várias bacias hidrográficas do bioma Cerrado.

O Cerrado é crucial para a dinâmica de águas no território brasileiro, sendo essencial para o abastecimento de água para o semiárido e estratégico para a manutenção do equilíbrio hidrológico do país. Os períodos de estiagens estão se tornando cada vez mais acentuados. Isto, aliado a um rápido desenvolvimento econômico da região e à falta de uma adequada estratégia de monitoramento e de gestão de recursos hídricos, têm contribuído para aumentar a escassez hídrica e as disputas pelo uso de água, comprometendo o abastecimento de

regiões importantes, como, por exemplo, o Distrito Federal (Agência Nacional de Águas, 2017).

Compreender o potencial hídrico dessa região é importante para o planejamento estratégico, o desenvolvimento econômico e o estabelecimento de políticas hídricas efetivas, que considerem as diferentes dimensões do uso e dos usuários de recursos hídricos. Neste contexto, quantificar e mapear a escassez de água é essencial para entender a vulnerabilidade à escassez de água nas regiões do Cerrado, o que contribuirá para assegurar a produção de alimentos e minimizar a pobreza por meio de desenvolvimento econômico.

Disponibilidade hídrica

O Cerrado pode ser visto como a caixa d'água na América do Sul, responsável por captar as águas pluviais que irão abastecer as nascentes de rios de várias bacias hidrográficas, além do Aquífero Guarani (Brasil, 2013). Com um perímetro de aproximadamente 37,3 milhões de quilômetros, a região do Cerrado inclui total ou parcialmente as seguintes regiões hidrográficas: Tocantins-Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Paraná, Paraguai, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Leste e Amazônica (Figura 1).

Das regiões hidrográficas, observa-se que 64,6% da área de drenagem da região hidrográfica do Tocantins-Araguaia encontra-se no Cerrado. Analisando-se as demais regiões, observa-se que 46,7% do São Francisco, 59,3% do Parnaíba, 46,0% do Paraná, 48,6% do Paraguai, 46,7% do Atlântico Nordeste Ocidental, 10,4% do Atlântico Leste e 3,7% da Amazônica se encontram dentro da região do Cerrado.

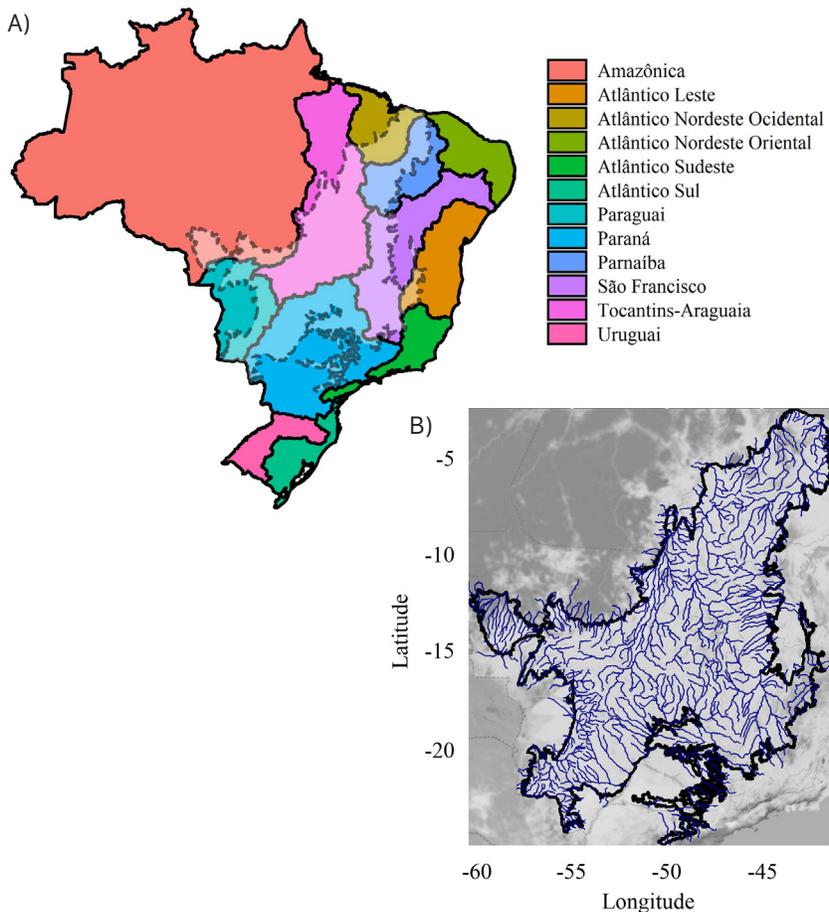


Figura 1. As principais regiões hidrográficas do Brasil (A) e a hidrografia do Cerrado (B).

Para avaliar a disponibilidade hídrica da região, foram utilizados dados de vazão provenientes de 607 estações fluviométricas (Figura 2). Os dados utilizados foram obtidos no portal HidroWeb¹. Também foram utilizadas nas avaliações as estações com menos de 10% de falhas para o período de junho de 2000 a dezembro de 2014 (~14,5 anos).

¹ Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>

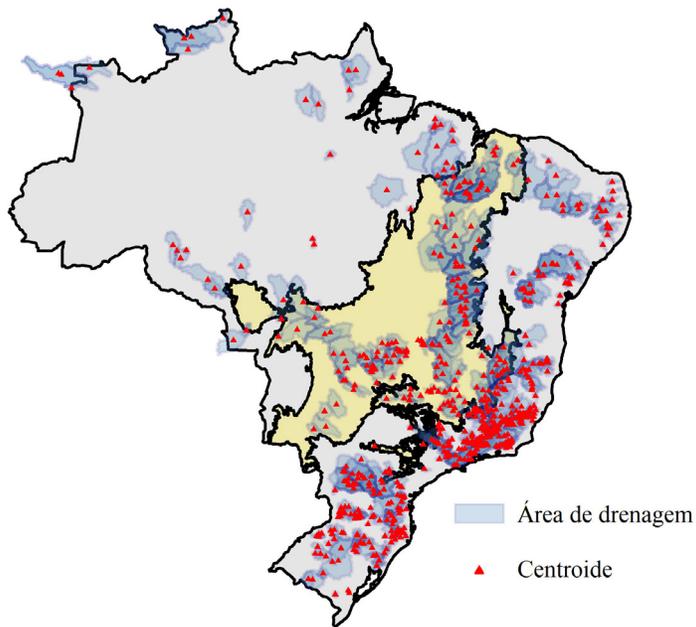


Figura 2. Área de drenagem e respectivos centroides das estações fluviométricas.

Na Figura 3, são apresentadas informações sobre as vazões referentes às estações cujas áreas de drenagem são inferiores a 50 mil quilômetros quadrados ($1 \text{ mm dia}^{-1} = \sim 11,6 \text{ L km}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Esse critério foi estabelecido para minimizar possíveis distorções no cálculo da disponibilidade hídrica devido a estações com grandes áreas de drenagem, evitando que um único valor de disponibilidade viesse a representar a realidade de toda a região.

Esse fato pode ser visto, por exemplo, nas estações fluviométricas próximas à foz da bacia do Rio São Francisco, onde locais distintos da bacia são caracterizados por climas diferentes (tropical e semiárido). No total, foram identificadas 222 estações que se enquadraram nesse critério e apresentaram área inteira ou parcialmente dentro do Cerrado. Para melhor representar a disponibilidade local das vazões,

foram apresentados os centroides das respectivas áreas de drenagem para as estações fluviométrica.

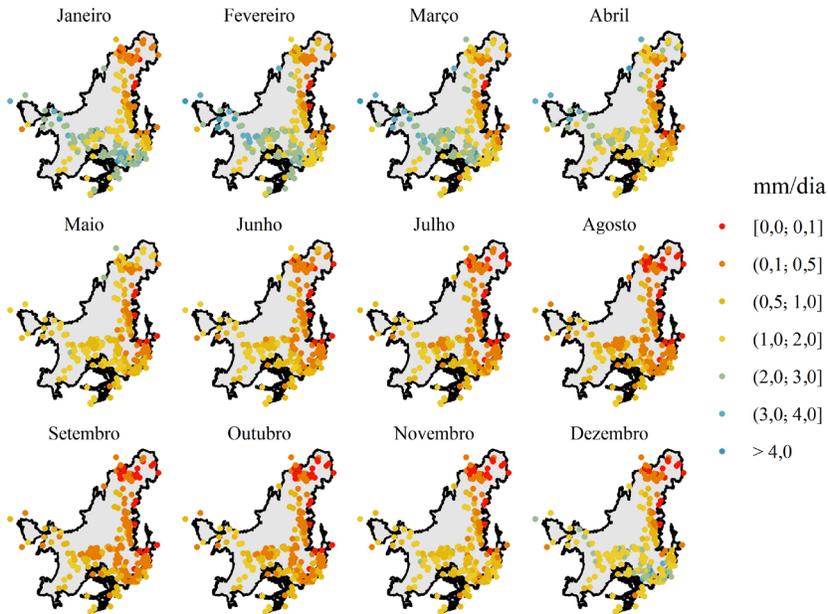


Figura 3. Vazão média mensal das estações fluviométricas do Cerrado, considerando o período de junho de 2000 a dezembro de 2014 (~14,5 anos).

Analisando a Figura 3, observa-se uma região, que vai do Oeste (município de São Felipe D'Oeste, RO) ao Sudeste (município de Nova Era, MG), cujas bacias se encontram totalmente ou parcialmente dentro dos limites do Cerrado, com maior disponibilidade hídrica de dezembro a abril. A partir de abril, fica evidente a redução da disponibilidade hídrica na região, chegando a valores inferiores a 1 mm dia^{-1} de vazão. Para a região Leste (município de Riacho dos Machados, MG) ao Norte do Cerrado (município de Chapadinha, MA), pode ser notada uma disponibilidade hídrica baixa ao longo de todo ano. Essas vazões são especialmente baixas de julho a dezembro para a região Norte, com muitos rios apresentando vazão intermitente. É possível notar

também que há coerência em relação ao índice de aridez, conforme foi apresentado na Figura 9 do Capítulo 3 desta obra. As regiões que apresentam elevado índice de aridez em grande parte do ano são as mesmas que apresentam baixa disponibilidade hídrica.

Contribuição do Cerrado para as regiões hidrográficas

A contribuição do Cerrado para a vazão de cursos d'água das principais regiões hidrográficas do país foi avaliada por meio do coeficiente de escoamento superficial, que representa a fração da precipitação (P) que é convertida em vazão escoada (Q) (Figura 4A). Para calcular o coeficiente, foi utilizada a precipitação média anual do IMERG (Huffman et al., 2019) para o mesmo período adotado na análise de disponibilidade hídrica (2000 a 2014). A razão entre vazão e chuva (Q/P) foi interpolada por krigagem ordinária para todo o território brasileiro (Figura 4B), possibilitando estimar a fração da chuva que contribui para a vazão em todo o território, e, conseqüentemente, a contribuição do Cerrado para as vazões nas principais regiões hidrográficas brasileiras.

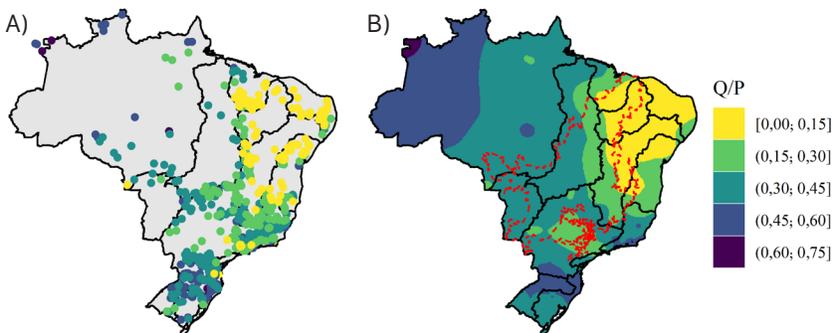


Figura 4. Coeficiente de escoamento (Q/P) obtido no período de 2000 a 2014 para os centroides de área de drenagem das estações fluviométricas (A) e (B) interpolado por meio de krigagem ordinária.

A relação entre vazão escoada e precipitação (Q/P), como ilustrado na Figura 4, indica que apenas uma pequena parte da chuva que precipita na região Leste e Norte do Cerrado, regiões hidrográficas do Parnaíba e São Francisco, se transforma em vazão. As partes dessas regiões hidrográficas fora do Cerrado apresentam clima ainda mais árido e menor coeficiente de escoamento, o que resulta em elevada contribuição do Cerrado para a disponibilidade hídrica dessas regiões em relação à sua ocupação em área.

Na Figura 5, está apresentada a contribuição do Cerrado para a vazão total das principais regiões hidrográficas brasileiras localizada neste bioma (Figura 5A e 5B). É possível observar a vazão disponível para as regiões hidrográficas, as quais se originaram em áreas do Cerrado. Da mesma forma, é possível observar a vazão disponível para as regiões hidrográficas que têm origem nas áreas do Cerrado, bem como a proporção dessas regiões ocupadas pelo bioma Cerrado (Figura 4B, barra em contornos tracejados). Conforme visto, é possível verificar que o Cerrado contribui para as vazões de oito das doze regiões hidrográficas, o que demonstra sua importância estratégica para a disponibilidade hídrica e o desenvolvimento econômico dessas regiões.

Em termos de área (Figura 5B), observa-se que a região hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a que apresenta a maior porcentagem de sua área como parte do Cerrado (64,6%), seguida das regiões hidrográficas do Parnaíba (59,3%), Paraguai (48,6%), Atlântico Nordeste Ocidental (46,7%), São Francisco (46,7%), Paraná (46,0%), Atlântico Leste (10,4%) e a Amazônica (3,7%).

Já em termos de vazão (Figura 5B), observa-se que a região hidrográfica do Parnaíba é a que apresenta a maior porcentagem de vazão originando em áreas de Cerrado (81,6%), seguida da região hidrográfica do São Francisco (74,8%), Tocantins-Araguaia (55,2%), Paraguai (51,6%), Paraná (41,7%), Atlântico Nordeste Ocidental (23,3%), Atlântico Leste (12,0%) e Amazônica (2,3%).

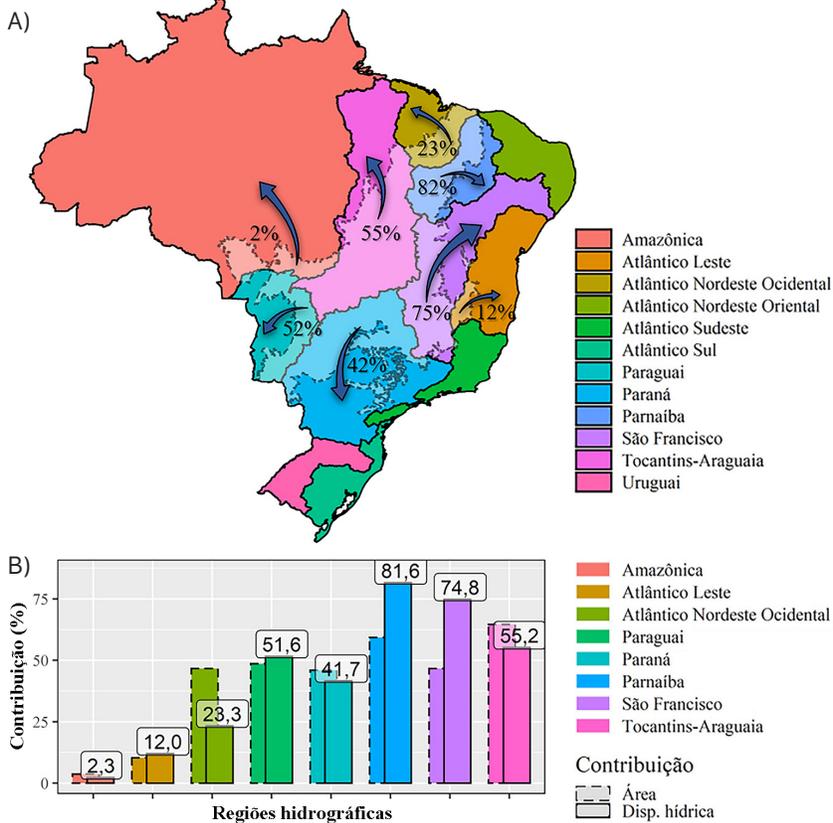


Figura 5. Contribuição do Cerrado para a vazão total das principais regiões hidrográficas do Brasil que se encontram dentro do Cerrado (A); a proporção de área das regiões hidrográficas do Brasil que se encontram dentro do Cerrado (B). As barras com contornos tracejados representam a proporção em área que as principais regiões hidrográficas do Brasil apresentam dentro do Cerrado, enquanto as barras em contornos sólidos representam a contribuição do Cerrado na vazão das mesmas.

A relação entre a proporção de área e a contribuição de vazão não é linear. Por exemplo, o Cerrado ocupa apenas 59,3% e 46,7% das áreas de drenagem das regiões hidrográficas do Parnaíba e São Francisco,

mas contribui com 81,6% e 74,8% da disponibilidade hídrica dessas regiões, respectivamente (Figura 5).

Por outro lado, para a região hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental, o Cerrado apresenta uma contribuição em disponibilidade hídrica proporcionalmente menor do que a área ocupada pelo bioma. Apesar de ocupar cerca de 46,7% da área dessa região hidrográfica, o Cerrado contribui com apenas 23,3% da disponibilidade hídrica. Isso se deve ao fato da porção do Atlântico Nordeste Ocidental ocupada pelo Cerrado apresentar baixo coeficiente de escoamento em comparação à porção ocupada pelo bioma Amazônia.

Como pode ser observado, o Cerrado tem papel estratégico em termos de recursos hídricos para várias regiões hidrográficas. Porém, para o São Francisco, ele é crucial, uma vez que impacta a qualidade de vida de mais de 15 milhões de pessoas que vivem em cerca de 505 municípios dessa região. Este fato demonstra a importância de ter uma visão integrada dos recursos hídricos, levando em conta os diversos usos e as especificidades das regiões. Para isso, é fundamental planejar e gerir estrategicamente esses recursos no Cerrado.

Critérios de outorga

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, 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 (Agência Nacional de Águas (Brasil), 2013).

Após a Constituição Federal de 1988, que definiu como competência da União a instituição do Sistema Nacional de Gerenciamento de

Recursos Hídricos (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 n.º 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Brasil, 2006).

A Política Nacional de Recursos Hídricos se baseia 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 Política Nacional de Recursos Hídricos e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; e (f) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos: (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 o dos setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional; (e) a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo; (f) a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.

São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos: (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.

A outorga e a cobrança, por impactarem diretamente as atividades dos usuários, possivelmente são os instrumentos mais conhecidos e debatidos pela sociedade. A legislação de recursos hídricos apresenta critérios importantes que devem ser considerados em todas as análises de outorgas realizadas, tais como as prioridades de uso estabelecidas nos planos de recursos hídricos e a preservação do uso múltiplo dos recursos hídricos. Isso significa que a disponibilidade hídrica de uma bacia não deve ser comprometida com apenas um usuário ou setor, em situações em que há diversos setores com interesses de uso.

A Agência Nacional de Águas, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, possui competências para emitir outorgas de direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, como rios e lagos que banham mais de um estado ou país e, ainda, as águas armazenadas em reservatórios de propriedade de entidades federais. Quando se trata de águas subterrâneas, dos rios estaduais e dos distritais, é responsabilidade dos Estados e do DF emitir outorgas de direito de uso desses recursos hídricos.

A dupla dominialidade das águas é um complicador adicional para a gestão de recursos hídricos. A adoção de critérios distintos, entre os órgãos gestores para a avaliação das vazões máximas outorgáveis é um complicador que pode comprometer a gestão.

A vazão máxima outorgável é, geralmente, uma fração de uma vazão de referência. As vazões referências utilizadas no Brasil são a $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} . A $Q_{7,10}$ é a vazão média mínima de 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos, enquanto as vazões Q_{95} e Q_{90} são as igualadas ou superadas em 95% e 90% do tempo ("vazão de permanência"), respectivamente. Para águas superficiais de domínio da União, a

vazão máxima outorgável é de 70% da vazão Q_{95} ; no entanto, isso pode variar em função das peculiaridades de cada região.

Outro aspecto a ser considerado diz respeito às águas superficiais que são de domínio de unidades federativas em que diferentes critérios são adotados para concessão de outorgas. Os critérios adotados para a região do Cerrado são apresentados na Tabela 1. Note que esses critérios variam de acordo com as peculiaridades de cada região e são determinados por diferentes legislações. Essas legislações são provenientes de decretos estaduais, distritais, resoluções provenientes de diferentes órgãos, como por exemplo o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH, CRH ou CEHIDRO) de cada estado, o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), o Instituto de Águas do Paraná (IAP), o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), entre outros.

Além da vazão máxima outorgável, na Tabela 1, são apresentados os critérios de limite máximo de vazões consideradas insignificantes e isentas de outorga. Contudo, em alguns casos, ainda é necessário registrar a captação e água junto ao órgão responsável.

Na Tabela 2, são apresentados os principais órgãos gestores e a legislação que institui a política de recursos hídricos para cada domínio hídrico.

Tabela 1. Critérios adotados para concessão de outorga para captação de águas superficiais no Cerrado.

Domínio	Legislação ⁽¹⁾	Vazão outorgável	Legislação ⁽²⁾	Vazão insignificante
União	-	70% da Q_{95} ⁽³⁾	Rs. ANA 542/2004	1,0 L s ⁻¹
BA	D.E. n° 6.296/1997	80% da Q_{90}	D.E. n° 6.296/1997	0,5 L s ⁻¹
DF	D.D. n° 22.359/2001	80% da Q_{90}	D.D. n° 22.359/2001	1 L s ⁻¹
GO	Rs. CERH/GO n° 9/2005	70% da Q_{95}	-	-
MA	D.E. n° 27.845/2011	20% da Q_{90}	D.E. n° 27.845/2011	0,2 L s ⁻¹
MG	Rs. conjunta SEMAD-IGAM n° 1.548/2012	50% da $Q_{7,10}$ ⁽⁴⁾	D.N. CERH/MG n° 9/2004	5,0 L s ⁻¹
MS	Rs. CERH/MS n° 25/2015	70% da Q_{95}	Rs. CERH/MS n° 25/2015	1,5 L s ⁻¹
MT	Rs. CEHIDRO n° 27/2009	70% da Q_{95}	Rs. CEHIDRO n° 27/2009	Até 0,5 L s ⁻¹ (se $Q_{95} > 200$ L s ⁻¹)
PA	Rs. CERH/PA n° 10/2010	70% da Q_{95}	Rs. CERH/PA n° 9/2009	1 L s ⁻¹
PI	Rs. CERH/PI n° 4/2005	80% da Q_{95}	-	-
PR	D.E. n° 1.590/2015	50% da Q_{95}	Po. IAP n° 130/2020	0,5 L s ⁻¹
RO	-	-	Rs. CRH/RO n° 4/2014	1 L s ⁻¹
SP	D.E. n° 43.284/1998	50% da $Q_{7,10}$	Po. DAEE n° 1.631/2017	25 m ³ dia ⁻¹
TO	D.E. n° 9.433/1997	75% da Q_{90}	D.E. n° 9.433/1997	1 L s ⁻¹ ou 21,6 m ³ dia ⁻¹

⁽¹⁾ Legislação referente à vazão máxima outorgável a fio d'água. D.E. = Decreto Estadual, D.D. = Decreto Distrital, Rs. = Resolução, Po = Portaria, D.N. = Deliberação Normativa; ⁽²⁾ Legislação referente à limites máximos de vazões consideradas insignificantes; ⁽³⁾ Pode variar em função da peculiaridade de cada região; ⁽⁴⁾ Exceções: 30% da $Q_{7,10}$ para bacias hidrográficas dos Rios Jequitai, Pacui, Uruçua, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paraopeba e Velhas (áreas dessas bacias consideradas pelo IGAM como de conflito pelo uso da água - limite de 50% da $Q_{7,10}$); ⁽⁵⁾ 0,5 L s⁻¹ em regiões de escassez.

Tabela 2. Órgãos gestores de água e legislação que institui a política de recursos hídricos para cada domínio.

Domínio	Órgão gestor	Legislação
União	Agência Nacional de Águas (ANA)	Lei nº 9.433/1977
BA	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA-BA)	Lei nº 11.612/2009
DF	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA-DF)	Lei nº 2.725/2001
GO	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD-GO)	Lei nº 13.123/1997
MA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA-MA)	Lei nº 8.149/2004
MG	Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)	Lei nº 13.199/1.999
MS	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL)	Lei nº 2.406/2002
MT	Superintendência de Recursos Hídricos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SURH/SEMA-MT)	Lei nº 11.088/2020
PA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS-PA)	Lei nº 6.381/ 2001
PI	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMAR-PI)	Lei nº 5.165/2000
PR	Instituto de Água e Terra (IAT) e Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST-PR)	Lei nº 12.726/ 1999
RO	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM-RO)	Lei nº 255/2002
SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE-SP)	Lei nº 7.663/ 1991
TO	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Tocantins (SEMARH-TO)	Lei nº 1.307/2002

Vazões de referência (assinaturas hidrológicas)

As assinaturas hidrológicas podem ser utilizadas para representar os padrões hidrológicos de uma bacia hidrográfica, como, por exemplo, o seu potencial para o desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. A vazão média (\bar{Q}), por exemplo, pode ser utilizada para descrever a disponibilidade hídrica potencial da região.

Dessa forma, a razão entre Q_{95} e \bar{Q} (Q_{95}/\bar{Q}) caracteriza uma disponibilidade hídrica relativa e indica o potencial de regularização de uma bacia hidrográfica (Althoff et al., 2021). Ou seja, quanto menor a disponibilidade hídrica relativa, maior o potencial de regularização e, assim, maior o volume de água que poderá ser armazenado tanto em grandes reservatórios como em pequenas barragens de terra em propriedades rurais.

O armazenamento do excesso de escoamento superficial durante a época chuvosa tem como objetivo disponibilizar a água em períodos de estiagem ou durante a estação seca, melhorando a sustentabilidade hídrica local. Logo, uma baixa disponibilidade hídrica relativa em regiões com valores baixos de Q_{95} pode significar um grande potencial de melhoria no uso sustentável de água, especialmente para o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Na Figura 6, são apresentados mapas representativos da vazão média (ou disponibilidade hídrica potencial), da vazão mínima de referência Q_{95} e da disponibilidade hídrica relativa. Os mapas foram elaborados com base no banco de dados HydroCerrado (Althoff et al., 2021, 2022). Esse banco de dados disponibiliza séries de vazões simuladas para ottobacias de nível 5 para todo o Cerrado no período de 2003 a 2019. Ottobacias são áreas de contribuição dos trechos de uma rede hidrográfica codificadas pelo método hierárquico de Otto Pfafstetter

(Furnans; Olivera, 2001). Apesar de algumas ottobacias serem interbacias, as vazões simuladas presentes no banco de dados HydroCerrado fornecem uma estimativa da disponibilidade hídrica gerada nessas unidades hidrográficas.

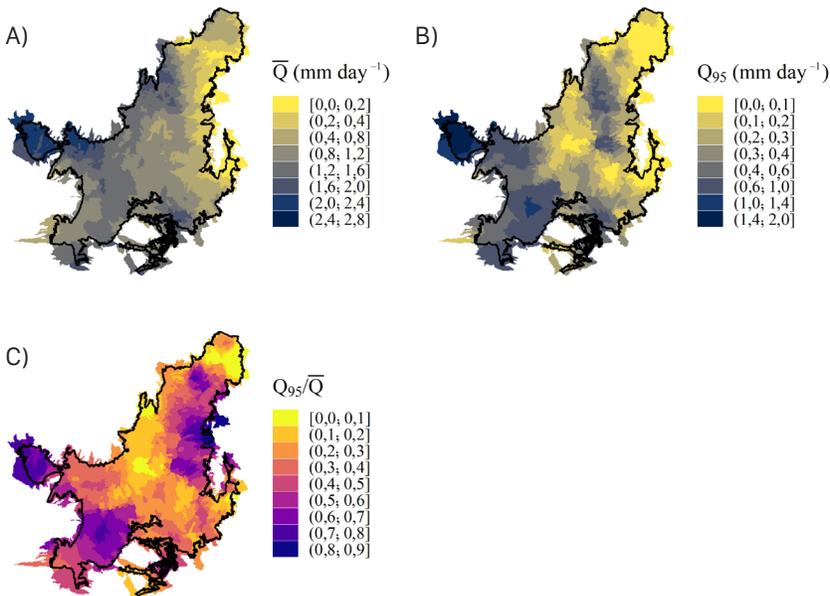


Figura 6. Vazão média (ou disponibilidade hídrica potencial) (A); vazão igualada ou superada 95% do tempo (B); e disponibilidade hídrica relativa (C).

A disponibilidade hídrica média e relativa é mais elevada para as regiões hidrográficas Amazônica e Paraguai, apresentando \bar{Q} médias de $1,94 \text{ mm dia}^{-1}$ e $1,47 \text{ mm dia}^{-1}$ e Q_{95}/\bar{Q} médias de $0,485 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,445 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente.

As regiões hidrográficas do São Francisco e Parnaíba apresentam baixos valores de disponibilidade hídrica média, com \bar{Q} médias de $0,564 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,371 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente. Contudo, essas regiões apresentam elevada disponibilidade hídrica relativa, com Q_{95}/\bar{Q}

médias iguais a 0,386 e 0,385, respectivamente, o que pode indicar um melhor cenário para a gestão de recursos hídricos. Por outro lado, as regiões hidrográficas com menores médias de disponibilidade hídrica para outorga são as do Atlântico Leste e Atlântico Nordeste Oriental, apresentando Q_{95} médias de 0,057 mm dia⁻¹ e 0,036 mm dia⁻¹, respectivamente, indicando atenção ao desenvolvimento de agricultura irrigada nesta região.

As regiões central e norte do Cerrado apresentam baixa disponibilidade hídrica relativa, o que indica que o uso sustentável de água pode melhorar através do armazenamento local desse recurso. Por exemplo, a ottobacia 73262 (Figura 6) apresenta Q_{95} de 0,06 mm dia⁻¹. Levando em consideração que 70% da Q_{95} é passível de outorga, observa-se uma disponibilidade de água para fins de irrigação de 0,044 mm dia⁻¹ (0,50 L km⁻² s⁻¹). Para essa ottobacia, a disponibilidade hídrica relativa (Q_{95}/\bar{Q}) é de apenas 0,28 mm dia⁻¹. De fato, há uma grande oportunidade para melhoria do armazenamento de água excedente no período de chuvas, a fim de aumentar a disponibilidade na estação seca.

Comparando seis regiões/ottobacias (Figura 7), nota-se uma maior disponibilidade hídrica para as ottobacias 44992 ($\bar{Q} = 2,15$ mm dia⁻¹) e 64982 ($\bar{Q} = 1,28$ mm dia⁻¹). Entre elas, observa-se uma maior disponibilidade hídrica relativa para a ottobacia 44992 ($Q_{95}/\bar{Q} = 0,71$), o que se deve a baixa sazonalidade das vazões. Essa região apresenta, portanto, elevada aptidão para agricultura irrigada. Por outro lado, a ottobacia 64982 apresenta baixa disponibilidade relativa ($Q_{95}/\bar{Q} = 0,21$), que pode ser melhorada por meio da instalação de pequenas barragens.

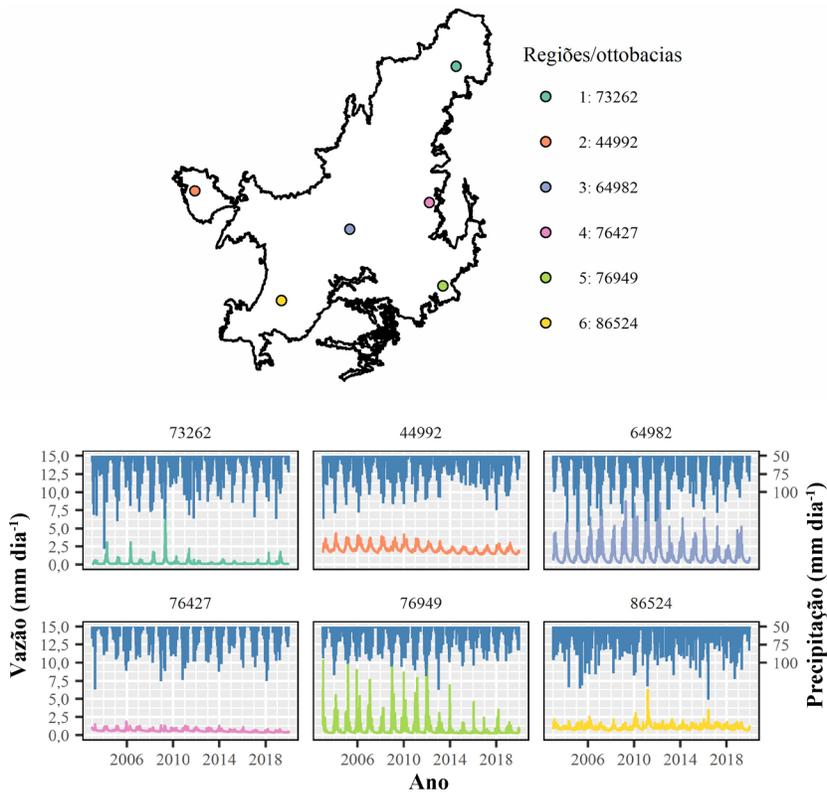


Figura 7. Séries de vazões simuladas para seis regiões distintas no Cerrado.

De forma geral, por meio da Q_{95r} , pode-se avaliar a vazão outorgável média para cada uma das principais regiões hidrográficas do Cerrado (Figura 8). Por exemplo, a região hidrográfica Amazônica é a que apresenta maiores valores de Q_{95} para suas ottobacias, variando de 0,25 a 1,77 mm dia⁻¹, com média de 0,95 mm dia⁻¹ (Figura 8A). Analisando a Q_{95} ponderada pela área de drenagem de suas ottobacias, obtém-se uma Q_{95} igual a 1,10 mm dia⁻¹ (Figura 8B). As regiões hidrográficas com as menores Q_{95} médias ponderadas pela área das ottobacias são Atlântico Leste (0,06 mm dia⁻¹), Atlântico Nordeste Ocidental (0,12 mm dia⁻¹) e

Parnaíba (0,18 mm dia⁻¹). Além da Amazônica (1,10 mm dia⁻¹), as únicas outras regiões que estão acima da média do Cerrado (0,41 mm dia⁻¹) são as do Paraguai (0,65 mm dia⁻¹) e do Paraná (0,51 mm dia⁻¹).

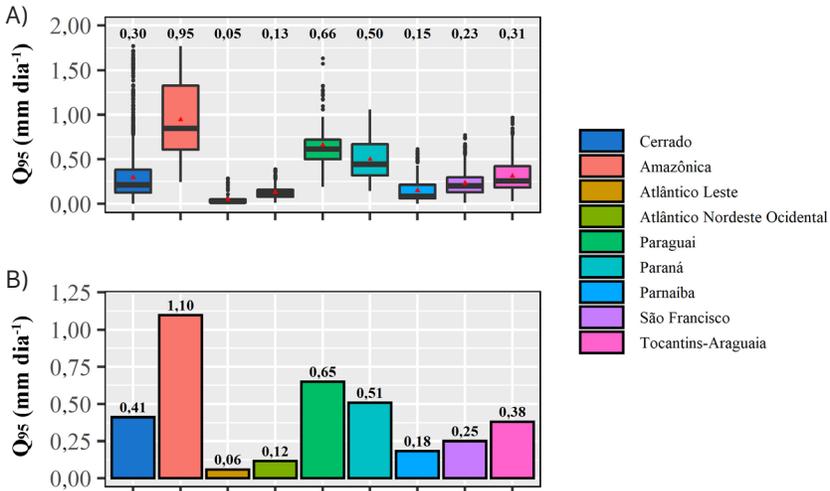


Figure 8. (A) Vazões igualadas ou superadas 95% do tempo (Q_{95}) para as ottobacias dentro do Cerrado e suas principais regiões hidrográficas e (B) a Q_{95} média ponderada pela área de drenagem de cada ottobacia. A média de cada boxplot é representado pelo triângulo vermelho e valor anotado.

Uma forma de aprimorar a gestão de recursos hídricos seria a adoção de vazões de referência baseadas no mês em questão (PRUSKI et al., 2014). Na Figura 9, apresenta-se, para o Cerrado, as vazões Q_{95} obtidas mensalmente para as ottobacias de nível 5. Nesse caso, nota-se que os meses da estação chuvosa apresentaram uma Q_{95} distintamente mais elevada do que a Q_{95} calculada a partir de dados anuais.

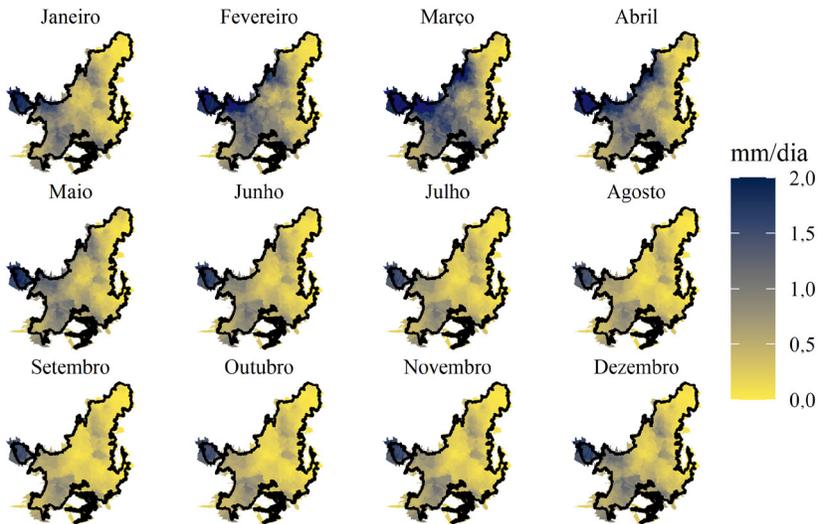


Figura 9. Vazão igualada ou superada 95% do tempo mensalmente para otto-bacias de nível 5.

A partir de vazões de referência mensais, pode-se, em alguns casos, aumentar a vazão outorgável em meses em que não há riscos relacionados à baixa disponibilidade hídrica ou até restringi-la em meses em que o risco é elevado. Na Figura 10, observa-se, por exemplo, regiões em que a disponibilidade hídrica mais que dobra ($> 100\%$) de dezembro a outubro ao se utilizar a Q_{95} mensal em relação a anual. Por outro lado, a Q_{95} mensal indica menor disponibilidade hídrica em relação à Q_{95} anual de agosto a novembro, indicando períodos em que o uso de água talvez tivesse que ser reduzido.

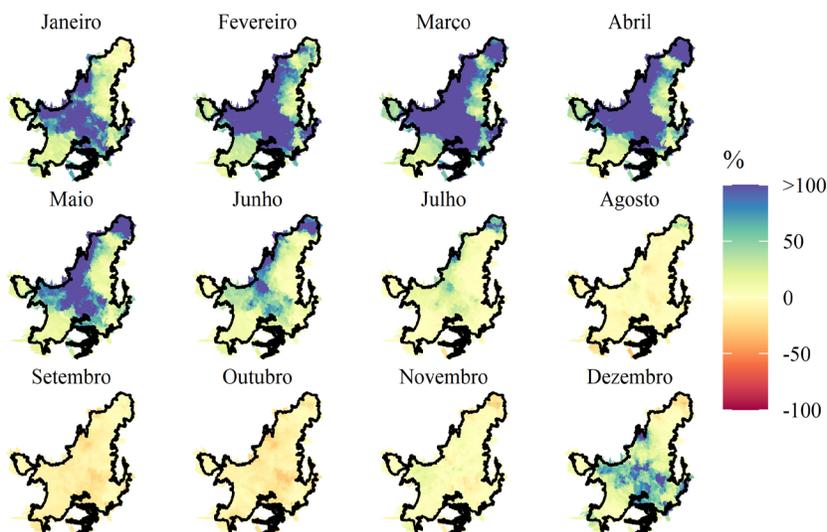


Figura 10. Diferença entre a Q_{95} mensal e a anual.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Brasília, DF, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Subsídios para a discussão da compatibilização da geração de energia hidrelétrica com expansão da agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Portal de metadados geoespaciais**. Brasília, DF, 2020. E-book. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório Pleno / Agência Nacional de Águas**. Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno setorial de recursos hídricos: agropecuária**. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/inserir-documentos-nos-artigos/pnrh/linha-do-tempo/2337-caderno-agropecuario/file>. Acesso em: 5 abr. 2021.

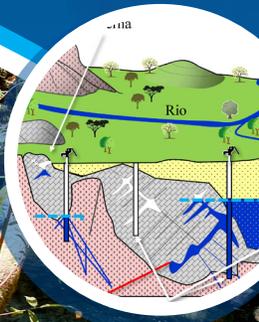
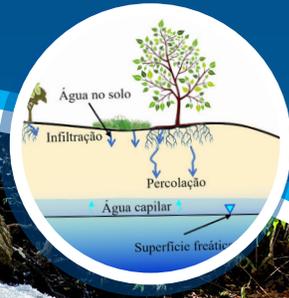
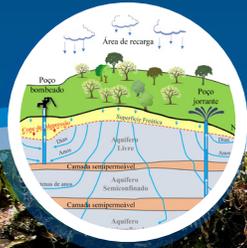
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, n. 11, p. 176, 2021.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Modelling & Software**, v. 149, 105615, 2022.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. **HydroCerrado**. Disponível em: <https://github.com/daniel-althoff/HydroCerrado/>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa nacional de conservação e uso sustentável do bioma Cerrado**: Programa Cerrado sustentável. Brasília, DF, 2013.
- FONTENELLE, T. H.; FERREIRA, D. A. C.; GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. (coord.). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019.
- FURNANS, J.; OLIVERA, F. Watershed topology: the Pfafstetter system. In: ANNUAL ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE 2001, 21., 2001, San Diego. **User Conference Proceedings**. Disponível em: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap1008/p1008.htm>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- HUFFMAN, G. J.; STOCKER, E. F.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; TAN, J. **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06**. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. Disponível em: 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06. Acesso em: 10 abr. 2020.
- PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; SILVA, L. M. C. da; SILVA, J. M. A. da; REGO, F. S.; JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 496-509, 2014.

CAPÍTULO 5

Potencial Hidrogeológico do Cerrado

Vagney Aparecido Augusto

José Eloi Guimarães Campos



Introdução

A frase “o Cerrado é o berço das águas” é comumente dita pelas pessoas que habitam a ampla região de distribuição deste bioma. Entretanto, a maior parte das pessoas, aparentemente, não entende o real significado dessa expressão.

A região do Cerrado tem um clima com marcante sazonalidade, evidenciada pela variação regular da umidade do ar, da temperatura, da nebulosidade, da evapotranspiração e das chuvas em certos períodos do ano. As chuvas são abundantes nesta região, variando em médias entre 1,5 mil e 1,2 mil milímetros por ano, contudo, são mais frequentes entre outubro e abril e menos frequentes entre maio e agosto.

Assim, como explicar que o Cerrado seja o berço das águas, se em média existe um período de 4 a 5 meses sem chuvas ou com baixa taxa de precipitações? A resposta a essa questão não está diretamente associada ao clima dos Cerrados, mas às suas águas subterrâneas. A disponibilidade de água na região do Cerrado deve ser pensada como a soma das águas excedentes das chuvas (nos períodos chuvosos) mais a produção hídrica dos aquíferos (nas épocas de secas).

Uma cena emblemática é a observação de uma vereda alagada ou de um córrego com água no pico do período seco, em que, mesmo sem a ocorrência de nenhuma chuva em mais de 120 dias, é possível observar água corrente em seu leito a uma distância de 1 km ou 3 km de sua nascente (Figura 1). Sem dúvida, o fluxo desse curso de água não é de escoamento de chuvas, mas mantido a partir da descarga do reservatório subterrâneo (aquífero).

A importância das chuvas para os mananciais é fácil de ser verificada. Basta iniciar as primeiras chuvas que a paisagem se transforma, de um ambiente seco amarelado para uma paisagem verde, tanto em áreas naturais quanto de lavouras não irrigadas. Por outro lado, é perceptível que as vazões dos cursos de águas superficiais aumentam

logo após o início das chuvas. Entretanto, a importância das águas subterrâneas para a manutenção hídrica das nascentes, córregos, rios e lagoas não é de fácil percepção, pois se trata de um manancial pouco tangível e não visível.



Foto: Vagny A. Augusto

Figura 1. Trecho do Ribeirão Santana cerca de 3 km de sua nascente, em agosto de 2022, no período seco, Distrito Federal.

Historicamente no Brasil, as águas subterrâneas não têm recebido, até o momento, a mesma atenção por parte das políticas públicas, gestores ou mesmo pelos setores usuários das águas, em comparação aos recursos hídricos superficiais.

Os mecanismos de armazenamento e circulação das águas subterrâneas são em grande parte desconhecidos pela sociedade e, por isso, os impactos, benefícios e sua importância para os ecossistemas, abastecimento humano e produção agrícola são negligenciados.

Assim, o objetivo deste Capítulo é apresentar os conceitos gerais sobre as águas subterrâneas, as funções e classificação dos aquíferos, e sua importância para a região do Cerrado. Dentro do possível, será utilizada linguagem acessível com apresentação de exemplos observados na própria região.

Os dados e informações apresentadas neste texto são provenientes de trabalhos técnicos e acadêmicos e da experiência dos autores sobre a hidrogeologia da região do Cerrado.

Aspectos conceituais

Aquífero é todo reservatório de água subterrânea, sendo representado por materiais naturais incluindo diferentes tipos de rochas ou solos (Fetter, 2004). O aquífero é dividido em duas porções principais: zona não saturada (ou de aeração) e zona saturada, tendo entre elas a zona de transição ou franja capilar (Figura 2). A descarga dos aquíferos mantém a perenidade dos cursos d'água superficiais nos períodos secos do ano.

Os aquíferos podem ser classificados em função dos tipos de espaços vazios que os compõem, estes espaços vazios são denominados em conjunto de porosidades. A classificação básica fundamentada nos tipos de porosidades inclui três grupos: aquíferos intergranulares, fraturados ou fissurais, e cársticos.

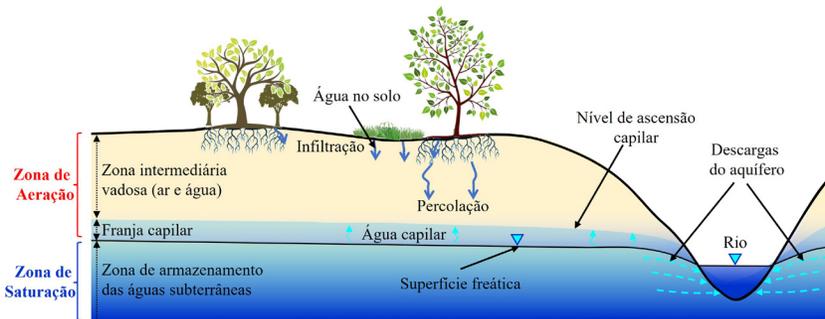


Figura 2. Seção esquemática mostrando as diferentes zonas do aquífero e suas relações com o rio.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos intergranulares (Figura 3) são aqueles em que a água está armazenada entre grãos e/ou fragmentos, ou seja, os reservatórios formados por solos (materiais inconsolidados) ou por rochas sedimentares (consolidadas ou maciças) (Freeze; Cherry, 1979). Aquíferos intergranulares rasos em solos são amplamente utilizados pela população, sendo representados por perfis de solos mais espessos. Em muitas cidades e áreas rurais da região do Cerrado, no Brasil, existem centenas de poços escavados de grandes diâmetros (cisternas ou cacimbas), que são construídos manualmente nesse tipo de aquífero, e servem como a principal fonte de água subterrânea para a população.

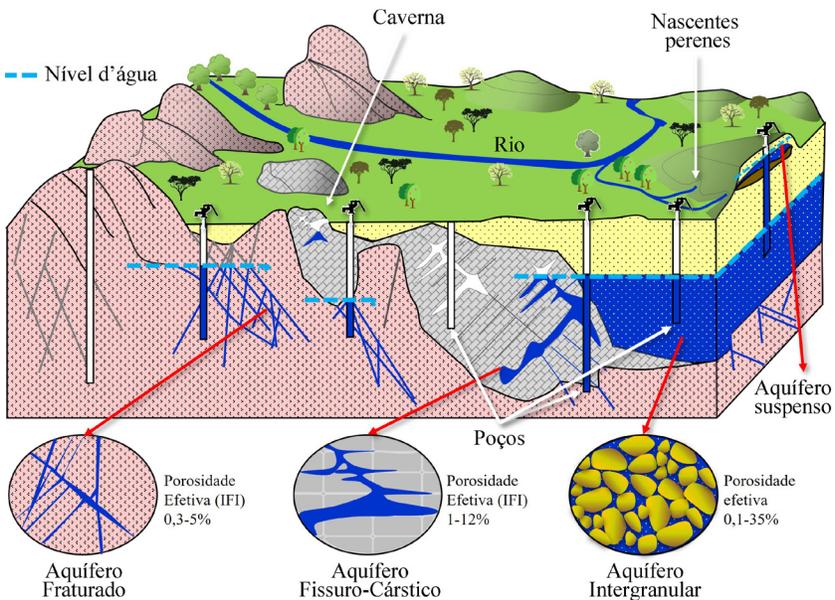


Figura 3. Modelo esquemático mostrando os principais tipos de aquíferos inter-relacionados (Fraturado, Cárstico e Intergranular) com diferenças entre níveis d'água e das fontes hídricas dos respectivos poços.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos fraturados englobam aqueles formados principalmente a partir das rochas metamórficas e ígneas (também chamadas

genericamente de cristalinas). Nesse caso, a água apenas ocupa as pequenas fendas presentes nos maciços rochosos, o que resulta em menor espaço para armazenamento (Feitosa et al., 2008). Nesse ambiente, também há muitos poços secos ou de baixas vazões (ou com pouca água).

Em rochas carbonáticas, são desenvolvidos os denominados aquíferos cársticos. Essas rochas têm a propriedade de se dissolver e formar grandes espaços internamente, resultando em cavidades, cavernas, abrigos ou grutas associadas a sumidouros e surgências. Nesse caso, é comum a presença de águas "duras" ou salobras devido ao elevado teor de bicarbonato (HCO_3^-) e cálcio (Ca^{2+}), que compõem os minerais das rochas. Águas "duras" são ricas em elementos/íons que causam problemas para a ação dos sabões, para cozimento e para sua utilização na indústria. Já as águas salobras são ricas em sais dissolvidos das rochas. A região nordeste do estado de Goiás pode ser citada como um exemplo desse tipo de aquífero na região do Cerrado (por exemplo, município de Mambaí, GO).

Outra proposta de classificação dos aquíferos divide-os genericamente em rasos e profundos. Os aquíferos rasos são tratados como livres ou freáticos e têm o topo da zona saturada sob condições de pressões atmosféricas. Alguns aquíferos freáticos, apesar de serem na maioria rasos, podem ter seu topo naturalmente a maiores profundidades (até maiores que cem metros). Um exemplo desta condição na região do Cerrado ocorre no extremo oeste do estado da Bahia, próximo à divisa com o estado de Goiás.

Os aquíferos rasos ou freáticos (Figura 4) têm grande importância para a sociedade, representando os primeiros reservatórios subterrâneos explorados para uso geral desde o início da humanidade. Também por serem livres e rasos, são vulneráveis aos processos de contaminação. Contudo, na ótica de recargas/descargas dos aquíferos, eles recebem anualmente a renovação cíclica de seus recursos hídricos com

a infiltração parcial das águas de chuvas, e mantêm a perenidade das nascentes e cursos d'água superficiais ao longo do ano.

Os aquíferos profundos, em muitos casos, não têm contato direto com a atmosfera e são relativamente isolados, devido a camadas de rochas menos permeáveis acima deles ou pelos próprios aquíferos mais rasos que os sobrepõem (Figura 4). A grande diferença entre os aquíferos rasos e profundos está nas condições de armazenamento, circulação e na capacidade de renovação das águas. Os aquíferos profundos demandam centenas de anos ou mais para a renovação de seus recursos hídricos, isso quando são conectados aos aquíferos sobrepostos, e muitos deles não têm seus recursos hídricos renováveis. Quando sistemas de aquíferos rasos e profundos coexistem e são hidráulicamente conectados, eles estão em equilíbrio mútuo e são interdependentes, de maneira que interferências em um podem refletir nas consequências que afetam a estabilidade do outro.

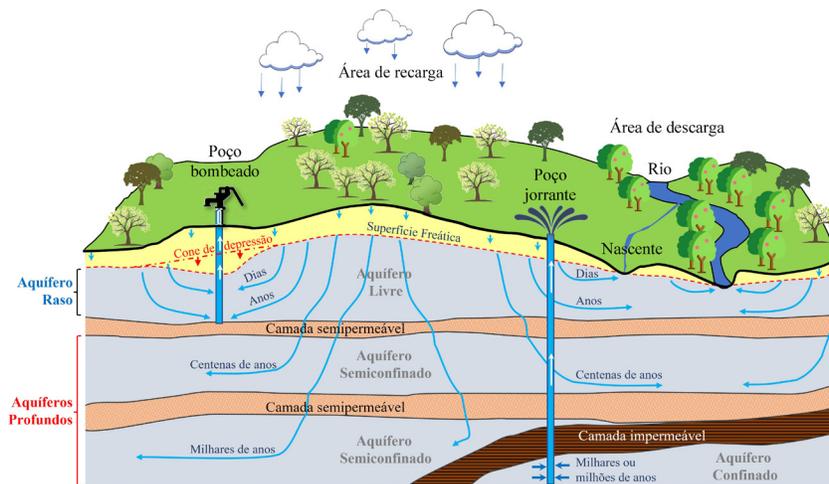


Figura 4. Modelo hidrogeológico esquemático ilustrando aquíferos intergranulares rasos e profundos com as respectivas diferenças temporais dos fluxos naturais de recarga.

Fonte: Adaptado de USGS (1998).

Ilustração: Vagney A. Augusto

Outra classificação dos aquíferos é relativa às condições de pressão na qual a água subterrânea está submetida, sendo classificados em livres, semiconfinados ou confinados. Os aquíferos livres têm contato direto com a atmosfera e estão abertos à infiltração das águas de chuvas. Quando o topo da zona saturada (superfície freática) do aquífero está submetido à pressão atmosférica, ele é chamado de livre ou freático, independentemente dos tipos de rochas ou solos que o compõem.

Os aquíferos confinados são aqueles que estão entre camadas impermeáveis ou estruturalmente aprisionados, sem troca de fluxo hídrico com seu entorno. Os aquíferos confinados geralmente estão em condições de sobrepressões (pressões superiores à da atmosfera), reflexos da presença de massas rochosas que favorecem o aprisionamento hídrico subterrâneo. Essa sobrepressão também reflete as condições hidrodinâmicas impostas pela presença de camadas impermeáveis no entorno, condicionando um confinamento total das águas subterrâneas nele armazenadas. Os aquíferos confinados, quando perfurados, favorecem a subida do nível de água acima do seu topo ou, em alguns casos, podem jorrar águas até acima da superfície do terreno, formando os conhecidos poços artesianos ou poços jorrantes.

Os aquíferos semiconfinados são aqueles que estão parcialmente confinados, uma situação intermediária entre livres e confinados, ou seja, estão parcialmente aprisionados por camadas semipermeáveis ou em condições estruturais que permitem parcialmente o fluxo hídrico subterrâneo.

Aquíferos suspensos são livres mas recebem essa nomenclatura adicional pela sua posição, que sempre ocorre acima de outro aquífero regional mais amplo (Figura 3). No geral, são aquíferos limitados a pequenas áreas e não armazenam grandes reservas hídricas. Esses são comuns em rochas sedimentares ou em sedimentos inconsolida-

dos, onde existem diferentes camadas com propriedades hidráulicas distintas. Sua formação é reflexo da presença de camadas menos permeáveis que causam o retardo ou interrupções das percolações descendentes das águas subterrâneas, formando acima dessas camadas zona saturada dentro da zona não saturada do aquífero regional. Esse tipo aquífero é comumente observado em regolitos/solos espessos, onde podem ser condicionados por níveis impermeáveis. Também é frequentemente encontrado no Cerrado, apesar de suas limitações quantitativas, tem grande importância na manutenção de nascentes, veredas, brejos e favorece fluxos de base das drenagens.

Porosidade efetiva, índice de fraturamento interconectado e índice de carstificação representam, respectivamente, o percentual de espaços disponíveis para o fluxo de água dentro do volume total dos aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos. É importante salientar que a porosidade efetiva reflete o volume total de espaços interconectados disponíveis para armazenamento hídrico nos aquíferos, e não o volume total de água possível de extração. Uma parte da água é sempre impedida de ser extraída devido às propriedades físicas de retenção, condições de armazenamento ou limitações do sistema de bombeamento do poço.

Os aquíferos têm três funções principais no ciclo hidrológico regional: (a) função de filtro; (b) função reguladora; e (c) função de reservatório.

A função de filtro corresponde à capacidade de depuração de eventuais cargas contaminantes e de impurezas presentes na atmosfera e em superfície. Nesse contexto as partículas finas, metais, organismos patogênicos e demais substâncias tóxicas podem ser retidas e/ou transformadas pelo arcabouço do aquífero, principalmente pela matéria orgânica e argilas presentes na zona não saturada do aquífero.

A função reguladora corresponde à função ecológica do aquífero e se refere à manutenção dos cursos de água superficiais e ecossistemas relacionados durante o período sem chuvas. Esta função é exercida pela variação anual do nível de água na zona de transição do aquífero (Figura 2). A água que alimenta as nascentes e rios vem da descarga do aquífero, cujo nível freático se eleva anualmente com a recarga de águas no período das chuvas. Após o término das chuvas, o nível freático segue rebaixando continuamente (descarregando) para manter regular os fluxos superficiais nos períodos secos.

O período de recessão das chuvas funciona como momento de estresse hídrico do ano, com baixa umidade do solo, diminuição das vazões dos córregos e nascentes e rebaixamento natural dos níveis de água nos aquíferos.

A função de reservatório é desempenhada na zona saturada do aquífero e corresponde ao armazenamento da água retida nos espaços dentro das rochas/solos por períodos prolongados. Desta forma, o aquífero pode ser considerado um local de reserva de água para uso humano e os demais elementos da natureza. Uma grande vantagem deste tipo de reservatório (aquífero) é sua capacidade de proteger a água contra processos de contaminação, evaporação, e do rápido escoamento das águas para os oceanos.

É importante salientar que o bombeamento e retirada de água dos aquíferos resulta em um rebaixamento dos níveis de água e mudanças em seu equilíbrio, podendo haver ampliação da recarga em alguns casos específicos, diminuição das vazões em cursos d'água superficiais, misturas de águas com profundidades diferentes e inversão de fluxos subterrâneos.

As águas subterrâneas também têm papel na estabilização geotécnica dos solos e rochas, tanto na zona saturada quanto na vadosa. Isso ocorre porque a água preenche os espaços nas rochas e solos e é

adsorvida por minerais, aumentando o seu volume e exercendo uma pressão hidrostática multidirecional, que aumenta estabilidade ao sistema. Noutro sentido, a retirada de água subterrânea pode causar instabilidade, favorecer colapsos e/ou afundamentos da superfície do solo e gerar danos em infraestruturas como prédios, casas, estradas e plantações. Em casos específicos, essa instabilidade pode levar a acomodações no subsolo e perda irreversível na capacidade de armazenamento do aquífero.

Outro conceito importante no âmbito de ocorrências e das relações de interdependências entre aquíferos são os sistemas aquíferos. Um sistema aquífero pode ser definido como uma unidade geológica ou conjunto de camadas de rochas, constituídas por diferentes subtipos de aquíferos com comportamento e propriedades hidráulicas distintas, que são conectados lateralmente e/ou verticalmente. Na prática, um sistema aquífero requer a existência de subtipos de aquíferos inter-relacionados hidraulicamente.

Para melhor entendimento sobre os sistemas aquíferos citam-se os seguintes casos:

- Sistema Aquífero Guarani, conhecido internacionalmente, é composto pelas unidades geológicas Botucatu e Piramboia que contêm subtipos aquíferos que variam verticalmente e lateralmente entre livre, semiconfinado e totalmente confinado. Esses subtipos, inclusive apresentam parâmetros hidráulicos distintos e são integrados em um sistema aquífero.
- Sistema Aquífero Urucuia representado por um grupo de rochas denominado Grupo Urucuia, sendo constituído por subtipos que variam verticalmente, incluindo livre, confinado ou semiconfinado e suspenso.

Aspectos legais sobre o uso das águas subterrâneas

Na legislação brasileira, as águas subterrâneas estão sob o domínio dos estados, e do Distrito Federal. Cada estado tem a responsabilidade de regulamentar, gerenciar e autorizar (outorgar) o uso das águas subterrâneas, exceto para produção de água mineral e águas termais (>25°C), que é de responsabilidade da União, executada pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

Na natureza, boa parte das águas subterrâneas e superficiais são interconectadas e interdependentes, entretanto, na legislação brasileira de recursos hídricos essas foram tratadas em separado. A gestão das águas subterrâneas cabe aos estados, enquanto das águas superficiais é compartilhada entre União e estados. Para evitar ou resolver problemas/conflitos na gestão das águas, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) emitiu a resolução nº 202, de 28 de junho de 2018, que estabelece novas diretrizes para ações de gestão integradas e articuladas entre os órgãos reguladores (federal, estadual e distrital). Com isso, a gestão dos recursos hídricos deve ser integrada, aplicáveis aos aquíferos livres e rios perenes onde exista conectividade direta entre águas superficiais e subterrâneas.

Os estados têm autonomia para regulamentar e definir os critérios de uso das águas subterrâneas. Cada estado pode utilizar distintos critérios para autorização de seus usos, podendo coexistir diferentes regras de uso para o mesmo aquífero/reservatório. Isso ocorre porque os aquíferos são formações geológicas naturais que não seguem os limites estaduais, e podem ultrapassar dois ou mais estados, ou países. Isso também é reflexo de uma legislação implantada com observância incompleta dos aspectos naturais das águas subterrâneas, gerando diferenças na definição de critérios sem considerar aspectos técnicos para o uso sustentável dos recursos subterrâneos.

No Cerrado, considerado o “berço das águas”, os critérios de outorga para o uso de suas águas subterrâneas não estão diretamente relacionados com as condições hidrogeológicas, comportamento climático, o uso e a ocupação do solo e sua relação com o Cerrado. Os critérios de outorga nos estados onde ocorre o Cerrado podem ser agrupados em objetivos e subjetivos. Os critérios objetivos são claramente definidos e delimitam de forma objetiva as condições para outorga. Já os critérios subjetivos são amplos e não delimitam condições precisas para outorga, e podem ser dependentes da subjetividade do avaliador ou do órgão gestor.

Neste contexto, as 11 unidades da federação que compõem o Cerrado dispõem de 15 critérios, sendo oito objetivos e sete subjetivos (Figura 5). Até o momento, o Distrito Federal é a única unidade federada que apresenta mais critérios objetivos, buscando uma relação com as condições de disponibilidade hídrica e sustentabilidade dos recursos. Nos demais, os critérios refletem exigências administrativas sem correlação direta com as condições hidrogeológicas locais. Isso pode condicionar uma gestão ineficiente desses recursos e, assim, favorecer o colapso do uso dos recursos hídricos subterrâneos a médio e a longo prazos, bem como o surgimento de conflitos entre os usuários.

Outro aspecto importante no cenário nacional das águas subterrâneas, que também reflete similaridade no Cerrado, é o grande número de poços tubulares irregulares (sem regularização). De acordo com o Instituto Trata Brasil, dados de 2018, 88% dos poços existentes no Brasil são irregulares (Hirata et al., 2019), os quais não seguem recomendações técnicas construtivas e não têm controle sobre uso. O mesmo estudo indica que em Goiás, estado com grande parte do território coberto pelo Cerrado dispõe em aproximadamente cem mil poços tubulares perfurados, dos quais 97% são irregulares e estima-se que cerca de 65 mil estão em áreas rurais.

Critérios de Outorgas para Águas Subterrâneas no Cerrado

UF	Critérios Objetivos								Critérios Subjetivos						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PI	48,0	50%	35 anos												
MA	60,0	100%	35 anos												
BA	43,2	D ¹	35 anos		D ¹									D ¹	
TO	21,6	100%	35 anos						S						S
DF	5,0	75%	10 anos	20 h		D	D	D	S	D	S				
GO	86,4	100%	12 anos									S	S		S
MS	10,0	100%	10 anos	20 h	200							S			
MT	10,0	80%	35 anos						S						
RO	86,4	100%	5 anos						S	S	S				
MG	10,0	100%	35 anos		200				S			S			S
SP	15,0	100%	10 anos						S	S	S				
PR	43,2	100%	20 anos	20 h					S			S	S		

D - Critérios com definição clara.

S - Critérios sem definição ou muito abrangentes.

¹ – ver Instrução Normativa INEMA nº03/2022

Exigências técnicas em todas UF

- Análises físico-químicas e bacteriológicas
- Teste de bombeamento/vazão
- Dados construtivos e litológicos do poço
- Plano de uso da água

Critérios Objetivos

1. Usos insignificantes (m³/dia)
2. Vazão nominal do poço (%)
3. Prazo máximo de outorgas (anos)
4. Tempo máximo de bombeamento (h)
5. Distância mínima entre poços (m)
6. Reserva explotável por aquífero (m³/ano)
7. Capacidade de recarga do aquífero
8. Vazão de segurança do aquífero

Critérios Subjetivos

9. Estudos hidrogeológicos
10. Análises por finalidade de uso
11. Análises das fontes de contaminação
12. Análises de interferências entre poços
13. Vazão média do aquífero
14. Vazão sustentável do poço
15. Fatores econômicos e sociais

Figura 5. Lista de critérios considerados para solicitação e autorização de outorga de direito de usos das águas subterrâneas nas unidades da federação inseridas parcialmente no bioma Cerrado, atualizada em 2022.

Na base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS) consultada em julho de 2021 (Companhia de Pesquisa..., 2022), foram obtidos dados de 56,5 mil poços dentro do bioma Cerrado (Figura 6). Esses poços indicam vazões somadas totais de 300 mil metros cúbicos por hora (7,2 bilhões de litros/dia), o que representa volume inferior a real extração de águas subterrâneas. É importante salientar que nessa

base de dados não são considerados os poços escavados (cisternas) e nascentes, pois, no geral, essas extrações são legalmente consideradas como usos insignificantes, não demandam outorga e em alguns estados apenas requerem seu cadastramento.

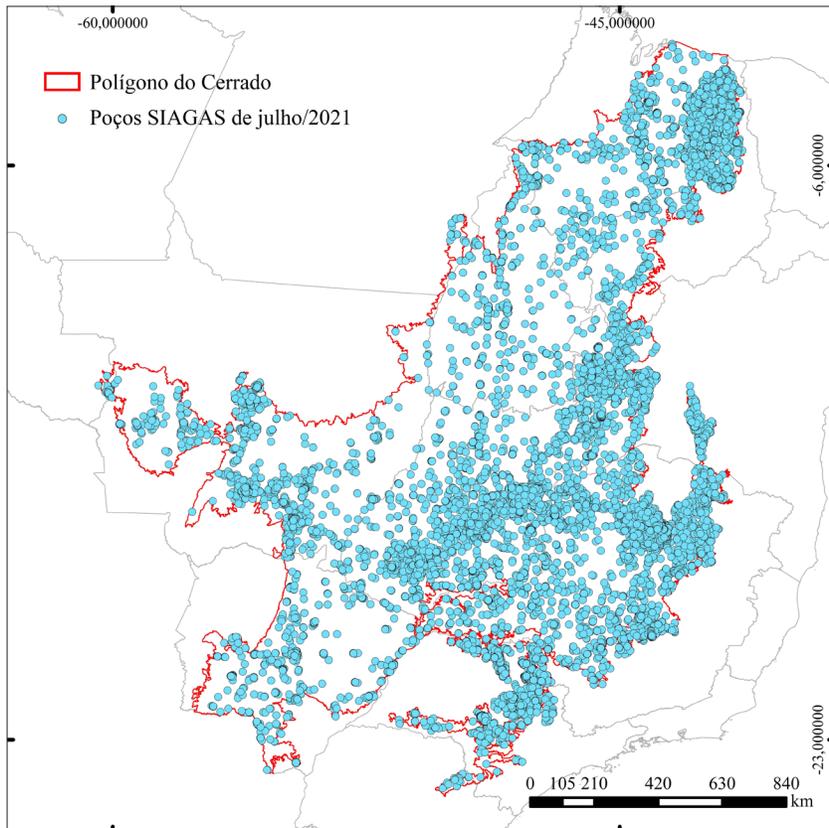


Figura 6. Mapa com a distribuição dos 56,5 mil poços na área do bioma Cerrado. Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2022).

Entretanto, é consenso que os usos insignificantes, inclusive pela facilidade de acesso, representam números muito maiores do que os poços tubulares. Embora a quantidade dos usos insignificantes seja

desconhecida pelos órgãos gestores, eles têm grande importância para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. De acordo com o Instituto Trata Brasil (Hirata et al., 2019), considerando dados atualizados até 2018, os quatro principais estados que mais dependem das águas subterrâneas para o uso rural são Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Goiás, nas unidades da Federação onde o Cerrado está inserido.

Potencial dos aquíferos rasos e profundos no Cerrado

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos, em uma razão aproximada, respectivamente de 60%; 38% e 2% da área total (Figura 7). A porção enquadrada como aquífero intergranular pode ser dividida em aquíferos rasos e profundos, sendo essa classificação relacionada à profundidade das camadas que compõem os reservatórios. Solos e sedimentos inconsolidados pouco espessos e subsuperficiais são os aquíferos rasos e arenitos de formações geológicas espessas (em geral mais profundas que 50 m) representam os aquíferos profundos. Os aquíferos fraturados têm potencial hídrico restrito, sendo apenas utilizados para complementação do abastecimento humano ou para suprir água a pequenas comunidades isoladas, não sendo viável para uso em irrigação ou uso intenso.

O potencial produtivo dos aquíferos é definido pela sua transmissividade, que pode ser compreendida como o produto da permeabilidade do material por sua espessura saturada, ou seja, a quantidade de água que flui horizontalmente no aquífero.

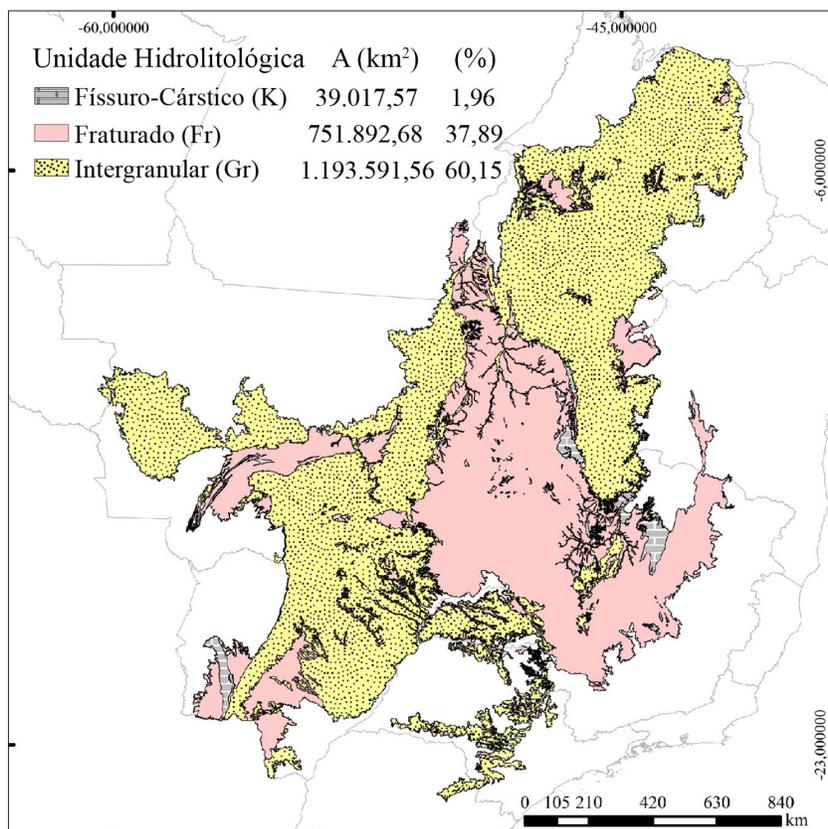


Figura 7. Mapa de ocorrência e proporcionalidade de área (A) dos tipos de aquíferos no Cerrado.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

Potencial dos aquíferos rasos

O potencial e as recargas dos aquíferos rasos estão intrinsecamente relacionados aos tipos de coberturas inconsolidadas ou solos. As coberturas inconsolidadas são representadas nos mapas de solos (Figura 8), recobrendo toda a área do Cerrado e estão representadas principalmente por solos classificados como: latossolo (43%), neosso-

lo quartzarênico (20%), plintossolo (10%), argissolo (10%), cambissolo (8,5%) e outros (8,5%).

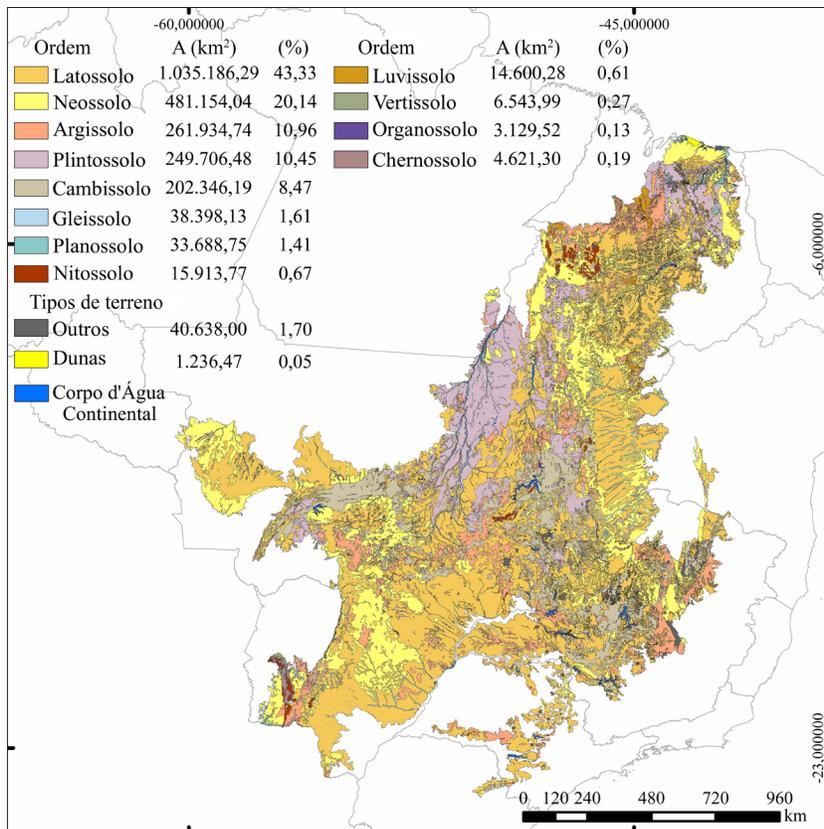


Figura 8. Mapa de ocorrências dos tipos de solos do Cerrado, e sua proporcionalidade em área. Os latossolos e neossolos quartzarênicos representam áreas mais favoráveis para a recarga dos aquíferos.

Fonte: IBGE (2021).

Os plintossolos e cambissolos não correspondem a áreas favoráveis para a recarga dos aquíferos devido à sua baixa permeabilidade, geralmente formam camadas superficiais pouco espessas que favorecem o escoamento superficial.

Genericamente, as regiões com maior favorabilidade para recarga são as áreas que ocorrem latossolos e neossolos quartzarênicos, que juntos representam mais de 60% da área total do Cerrado. 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.

Os solos enquadrados como argissolos também são bastante importantes na condição de regulação da recarga, pois, embora sejam de textura argilosa ou muito argilosa, são muito estruturados, o que lhes confere elevada permeabilidade, principalmente nos horizontes mais rasos do perfil de solo.

Os aquíferos rasos, embora não tenham elevado potencial para abastecimento, mantendo restritas vazões expressivas nos poços de captação, são fundamentais para a recarga dos aquíferos profundos e para a regularização das vazões dos cursos de água superficiais, incluindo nascentes, córregos, lagos e rios.

Além dos solos, as coberturas inconsolidadas cenozoicas também são enquadradas nos aquíferos rasos, pois não apresentam espessuras saturadas significativas. Neste conjunto podem ser enumerados os colúvios depositados no sopé da Serra Geral de Goiás e os depósitos das planícies dos rios Tocantins e Araguaia (ver Sistema Aquífero Araguaia-Bananal a frente).

Potencial dos aquíferos profundos

Os aquíferos profundos estão relacionados às camadas de rochas profundas, e seu potencial é vinculado ao conjunto de rochas a que estão associados. Estes reservatórios apresentam potencial variável, e, em alguns casos, é possível bombear dezenas de metros cúbicos de água por hora, enquanto em outros a vazão é limitada.

Com relação ao potencial para irrigação de grandes áreas, apenas alguns sistemas apresentam condições hidrogeológicas adequadas a este tipo específico de uso, que demanda volumes expressivos de água diariamente.

Os aquíferos de grande potencial quantitativo ocorrem em grandes áreas ou em regiões restritas (relativas ao Cerrado como um todo) e associados às bacias sedimentares cuja poligonal ocorre parcialmente dentro do Cerrado (aquíferos intergranulares, Figura 9). Na mesma figura também se observa os aquíferos fraturados, que no geral, não têm potencial hídrico suficiente para uso em irrigação, sendo destinados ao abastecimento de áreas rurais, núcleos urbanos isolados ou para a complementação do abastecimento em grandes cidades.

Importante destacar também que há áreas em que os tipos de aquíferos se sobrepõem, o que favorece a existência de aquíferos intergranulares sobrepondo aquíferos fissuro-cársticos ou fraturados ou outros subtipos intergranulares. Essa sobreposição natural por vezes favorece o confinamento dos aquíferos mais profundos, dificultando ou impedindo sua recarga anual. As ocorrências de aquíferos sobrepostos e a complexidade hídrica gerada devem ser consideradas no planejamento do uso e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

O potencial quantitativo de um aquífero deve considerar os volumes de água acumulados e sua condição de circulação e recarga. A avaliação do potencial de um aquífero, com base apenas na sua porosidade, permeabilidade, transmissividade e espessura pode ser frágil, pois pode se tratar de um reservatório com restrita recarga e assim, sem renovação hídrica, e poderá entrar em colapso após algum tempo de bombeamento.

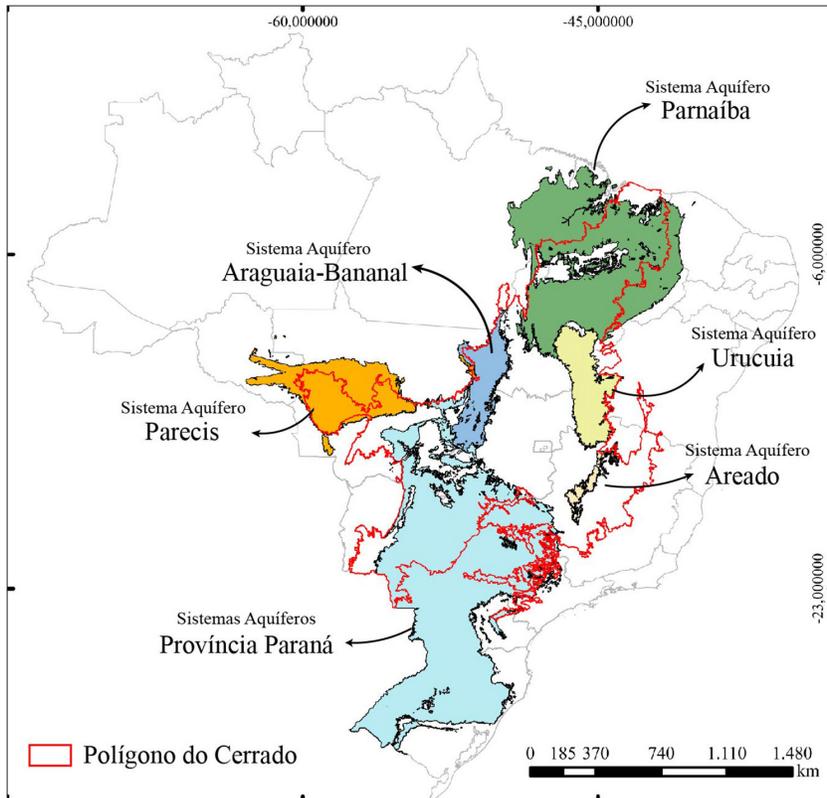


Figura 9. Mapa de ocorrência dos principais sistemas aquíferos intergranulares no Cerrado (áreas destacadas em cores). Áreas em branco dentro do polígono do Cerrado marcam os aquíferos classificados como fraturados.

Principais aquíferos que ocorrem no Cerrado brasileiro

No âmbito do Cerrado, os aquíferos intergranulares mais relevantes ocorrem em regiões de cinco bacias sedimentares de grande extensão geográfica, representadas pelas bacias do: Parnaíba, Parecís, Paraná, Bananal e Sanfranciscana. As bacias do Parecís, Paraná e Parnaíba formam aquíferos que extrapolam os limites do bioma Cerrado.

As bacias hidrogeológicas foram definidas conceitualmente por Arraes e Campos (2007) e Arraes (2008) como a região que corresponde aos limites entre as zonas de recarga e descarga de um determinado aquífero. Entretanto, bacias hidrogeológicas sedimentares também coincidem com os limites das bacias sedimentares, que por sua vez, correspondem aos limites de antigas depressões topográficas que ao longo do tempo geológico foram preenchidas por vários tipos de sedimentos. Esses diferentes tipos sedimentares se sobrepõem e formam grandes pacotes sedimentares sobrepostos somando espessuras que podem atingir centenas de metros. Com a evolução geológica, as camadas sedimentares das bacias se transformam em rochas que armazenam águas subterrâneas e assim formam diferentes aquíferos intergranulares inter-relacionados em sistemas de aquíferos complexos e sobrepostos.

Normalmente, as bacias sedimentares dispõem de vários aquíferos em camadas sub-horizontais, onde parte aflora na superfície e os demais ficam a grandes profundidades. As partes aflorantes (superficiais e rasas) dos aquíferos, em geral, são livres e recebem influência da sazonalidade climática, e funcionam de forma dinâmica com recarga e descarga anuais. Entretanto, cabe frisar que o tempo de resposta nos aquíferos com recarga e descarga por influência das chuvas é muito lento (fluxo hídrico subterrâneo é da ordem de cm/dia).

As águas de chuvas ocorridas hoje podem necessitar de meses para atingir o aquífero, e anos ou centenas de anos para chegarem às zonas de descarga (nascentes e drenagens). Assim, os aquíferos aflorantes podem ter relação direta com as águas superficiais, favorecendo o funcionamento das nascentes, mantendo lagos, riachos e rios perenes mesmo nos períodos de estiagem ou de secas prolongadas. As águas que estão nascendo e mantendo os rios hoje, são reflexos de chuvas ocorridas nas zonas de recarga dos aquíferos contribuintes em anos anteriores. Portanto, os aquíferos funcionam como agentes reguladores do sistema hídrico superficial, recebendo e armazenando água para disponibilizar no futuro.

Os aquíferos profundos em bacias, em geral, são isolados e recebem renovação hídrica anual restrita ou nula, mantendo seus volumes hídricos preservados estagnados por centenas ou milhares de anos. Essas águas são consideradas "fósseis" devido à sua presença estagnada por milhares de anos, que podem dissolver minerais e se enriquecer de sais das rochas, tornando-as salinizadas e, às vezes, não potáveis ou não úteis para outros fins (ex. irrigação) (Appelo; Postma, 1996).

Observe-se que os aquíferos profundos também funcionam como uma base de sustentação física e hidrodinâmica dos sistemas aquíferos superiores (mais rasos), de forma que o seu uso pode interferir diretamente no equilíbrio dos aquíferos superiores (induzir trocas hídricas, reduzir volumes, induzir acomodações de blocos rochosos e do terreno, etc.).

A seguir, estão descritas as principais bacias e seus aquíferos intergranulares presentes no Cerrado, assim como as estimativas de reservas hídricas subterrâneas dos seus principais aquíferos.

As reservas hídricas subterrâneas são estimadas a partir da definição das porosidades efetivas das rochas que o compõem os aquíferos, das espessuras saturadas dos aquíferos, e das dimensões da área de ocorrência. Com esses parâmetros, é possível calcular as reservas hídricas (volume hídrico armazenado) por meio da seguinte expressão simplificada (Costa, 2000):

$$R_p = A \times \eta_e \times b$$

Em que:

R_p - reservas hídricas do aquífero

A - área total do aquífero

b - espessura média saturada do aquífero

η_e - porosidade efetiva média do aquífero

Para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas foram utilizadas informações de diversos estudos e dados de poços dos sistemas SIAGAS/SBG-CPRM, assim como mapas de ocorrências geológicas (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022). O software ArcMap (Esri) foi utilizado para aplicar funcionalidades de análises espaciais. É importante destacar que os valores calculados são aproximados e visam indicar a dimensão e a grandeza das reservas hídricas subterrâneas no Cerrado, considerando a falta de informações consolidadas sobre o assunto na literatura.

Sistemas aquíferos da Província Parnaíba

Estes sistemas de aquíferos coincidem com a área da província sedimentar do Parnaíba, região composta por um sistema de quatro bacias sedimentares sobrepostas. Região que abrange áreas de vários estados do Nordeste brasileiro (Figura 10). Entretanto, o Cerrado só ocorre em 57% da totalidade da Província Hidrogeológica do Parnaíba. Essa região é formada por várias formações geológicas das quais, algumas são aquíferos relevantes (rochas arenosas) e outras não são consideradas aquíferos (rochas argilosas) devido à sua baixa capacidade de armazenar ou transmitir águas subterrâneas.

Para efeitos de simplificação dos cálculos de reservas hídricas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba, as unidades aquíferas consideradas foram somente as aflorantes, com ocorrências dentro do Cerrado, assim como segue: unidades denominadas Codó, Itapecuru, Corda, Motuca, Pedra de Fogo, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande. As unidades Longá e Pimenteiras não foram consideradas para cálculos, pois são formações compostas de rochas não aquíferas (materiais argilosos). Também não foram consideradas as áreas ao nordeste (formação Barreiras) e no centro-oeste da bacia, áreas de ocorrências de aquíferos fraturados onde há poucos dados para estimativas das reservas.

Baseando-se em dados de poços tubulares disponibilizados pelo sistema SIAGAS (julho/2021) e nas áreas poligonais dos aquíferos aflo-

rantes (Agência Nacional de Águas, 2017), as reservas hídricas subterâneas de todas as unidades aquíferas intergranulares citadas foram estimadas. Para isso, foram considerados somente dados de poços com profundidade de até 250 m, total de 5.956 poços, e se assumiu uma porosidade efetiva média das unidades de 15%.

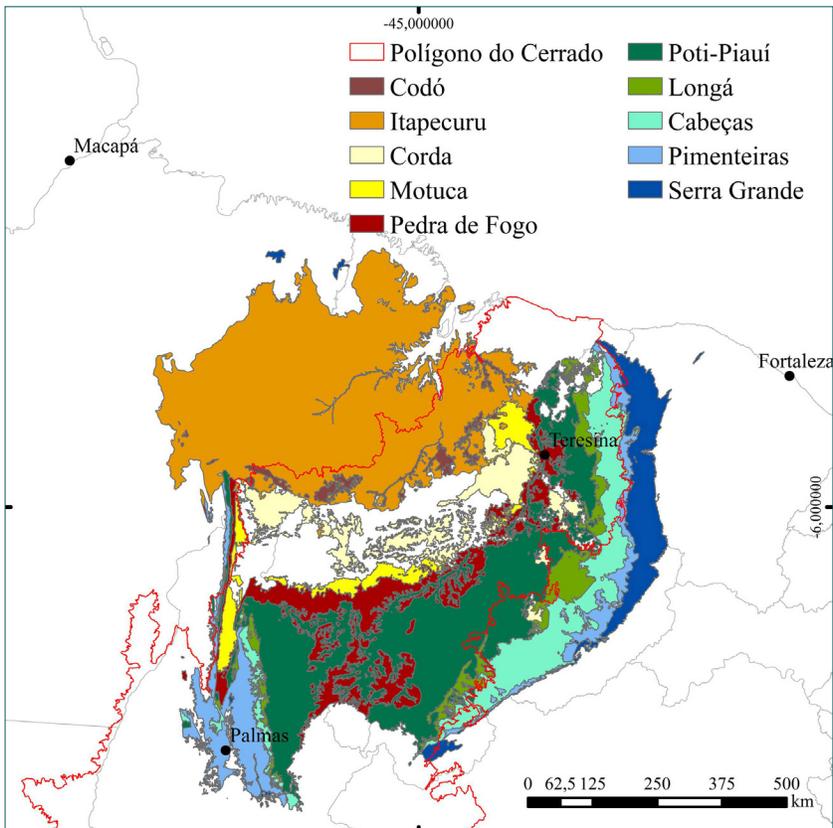


Figura 10. Mapa dos aquíferos aflorantes da Província Hidrogeológica do Parnaíba, vinculada à bacia sedimentar do Parnaíba.

As reservas em volumes totais estimados dos sistemas aquíferos do Parnaíba foram de 6.668,22 km³, e desse total, o volume de 3.822,66 km³ (57%) ocorrem no Cerrado. Esse valor corresponde ao somatório das unidades aquíferas do sistema Parnaíba apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Parnaíba, considerando profundidade máxima de até 250 m.

Unidade aquífera	Nº poços	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Cabeças	906	88,56	49.666,78	20.684,09	659,77	274,77
Codó	41	101,89	8.311,48	7.831,71	127,03	119,70
Corde	201	78,69	35.117,91	34.342,23	414,51	405,36
Itapecuru	1.426	79,66	207.300,75	50.730,15	2.477,04	606,17
Motuca	48	81,29	19.810,95	18.229,45	241,56	222,28
Pedra de Fogo	1.534	88,53	50.547,04	49.018,98	671,24	650,95
Poti-Piauí	1.578	87,08	129.956,12	116.633,54	1.697,49	1.523,47
Serra Grande	222	78,57	32.207,23	1.694,30	379,58	19,97
Total					6.668,22	3.822,66

Importante ressaltar que as reservas aqui estimadas consideram os aquíferos aflorantes e zonas saturadas com profundidades máximas de até 250 m, profundidades típicas de poços usados com fins de produção hídrica. Nessa região existem poços com profundidade de até 1.241 m, que, no geral, são utilizados para fins exploratórios de pesquisas, e que não são comumente utilizados para fins de produção hídrica (estes foram descartados).

Entre os aquíferos mencionados, alguns podem alcançar profundidades superiores a 250 m, chegando a 900 m de profundidade com 650 m de zona saturada (por exemplo o aquífero Serra Grande). Se fossem consideradas as espessuras totais dos aquíferos e todo o volume de água comprimido nos aquíferos confinados, o valor de reserva hídrica subterrânea seria bem maior. No entanto, foi optado por seguir um princípio conservador e utilizar profundidades comuns entre os poços com dados disponíveis e representatividade geográfica. É importante destacar também que as reservas não calculadas (mais profundas) podem ser volumes explotáveis, mas não são necessariamente renováveis ou potáveis. A grande maioria das águas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba são antigas ou fósseis, refletindo as condições geológicas e climáticas da região, que condicionam uma baixa capacidade de renovação hídrica.

Na literatura, os aquíferos mais relevantes desta região são: Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí. São predominantemente compostos por arenitos, com boas espessuras e produção hídrica. No entanto, os aquíferos Serra Grande e Cabeças ocorrem principalmente em profundidades maiores, sendo, portanto, predominantemente confinados. Nestes casos, devido à sobrepressão de confinamento, os poços que os atravessam podem produzir águas jorrantes acima da superfície (poços artesianos). Estes fatos são bem conhecidos na região do Vale do Gurguéia (Piauí), onde já existem vários poços deste tipo abastecendo a região. Já o aquífero Poti-Piauí é considerado livre e compõe

a maior reserva hídrica subterrânea aflorante do sistema Parnaíba dentro do Cerrado (Tabela 1). O aquífero Itapecuru é do tipo livre e semiconfinado, tem grande extensão aflorante, mas apenas 25% de sua área está no bioma Cerrado. Suas potencialidades produtivas são consideradas moderadas, mas com boas condições de recarga.

Sistemas aquíferos da Província Paraná

Na Província Paraná, destacam-se na área do Cerrado os seguintes aquíferos e sistemas aquíferos: Furnas, Ponta Grossa, Guarani, Serra Geral e Bauru (Tabela 2; Figura 11).

O Sistema Furnas está associado com rochas conglomeráticas na base e areníticas silicificadas no topo da unidade aquífera, sendo denominado de aquífero de dupla porosidade com espaços de armazenamento hídrico dos tipos intergranulares e fraturas interrelacionadas. Ocorre, de forma livre, nas porções noroeste do estado de Goiás e no sul de Mato Grosso, tendo continuidade para o interior da Bacia do Paraná, onde se apresenta sob confinamento. Na região de Rondonópolis, MT, apresenta vazões expressivas, sendo utilizado para o abastecimento humano e industrial (Cutrim et al., 2021).

O Aquífero Ponta Grossa ocorre na forma de intercalações de rochas arenosas com rochas argilosas, apresentando menores vazões e menor potencial produtivo, não sendo aproveitado para uso em sistemas de irrigação de maiores portes como pivôs centrais.

O Sistema Aquífero Guarani é um dos maiores reservatórios subterrâneos do mundo, ocupando área superior a um milhão de quilômetros quadrados (Araújo et al., 1999; Borghetti, 2004; Oliveira, 2009), saindo do território brasileiro e adentrando na Argentina, Uruguai e Paraguai. No Cerrado, ocorre em áreas de exposição restritas, contudo, pode ser explorado a partir de poços que atravessem toda a espessura das rochas vulcânicas que compõem a camada confinante, acima.

Tabela 2. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Paraná, considerando suas áreas de afloramentos com espessura saturada média de 100 m.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Bauru-Caiuá	15	100	353.369,96	211.290,57	5.300,55	3.169,36
Serra Geral	3	100	420.589,50	81.545,24	1.261,77	244,64
Guarani	15	100	89.220,79	52.517,45	1.338,31	787,76
Ponta Grossa	12	100	34.951,60	32.526,24	419,42	390,31
Furnas	10	100	28.738,22	26.358,19	287,38	263,58
Total					8.607,43	4.855,65

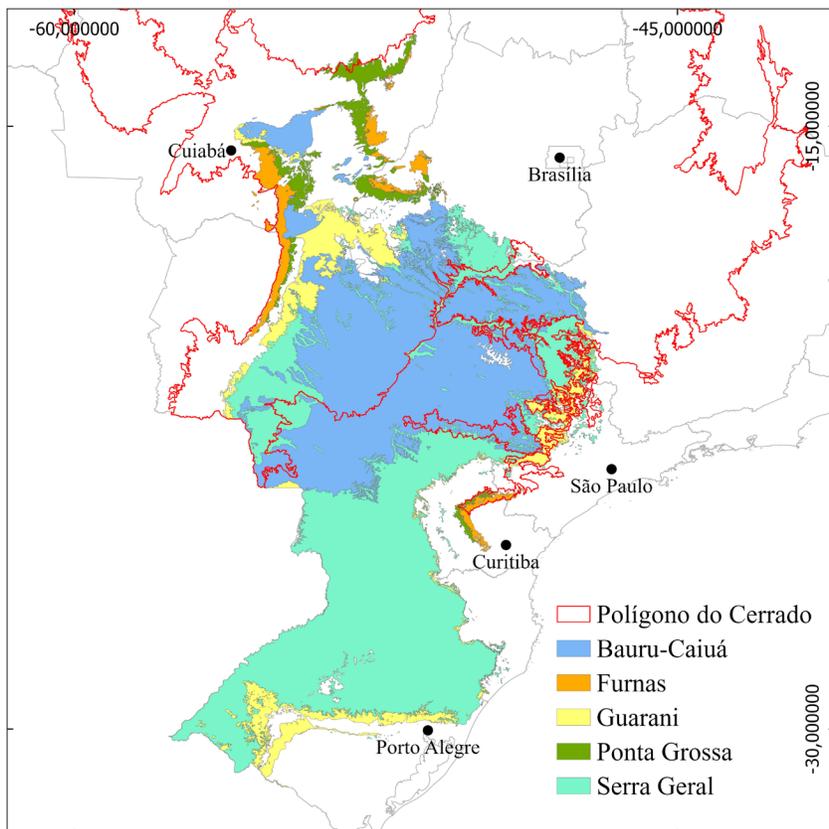


Figura 11. Mapa dos aquíferos associados à "Província Hidrogeológica do Paraná", vinculada à bacia sedimentar do Paraná.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

São reservatórios do tipo intergranular, podendo ocorrer de forma livre, semiconfinado ou totalmente confinado. O Sistema Aquífero Guarani tem potencial muito elevado, sendo inclusive possível ser utilizado para irrigação de grandes áreas. Contudo, sua exploração deve ser precedida de estudos específicos, pois em áreas de confinamento (que são predominantes) as condições de recarga são pouco favoráveis.

O Sistema Serra Geral é um aquífero fraturado associado a rochas vulcânicas e, por isso, apresenta vazões mais reduzidas e inclusive poços secos. Entretanto, por ocorrer em amplas áreas de exposição, é um aquífero muito utilizado para o abastecimento de cidades e propriedades rurais na região do Cerrado.

É um aquífero fraturado uma vez que as rochas vulcânicas de composição basáltica não apresentam poros intergranulares, mas apenas uma densa rede de fraturas que permite o armazenamento e transmissão de águas em taxas expressivas, podendo alcançar dezenas de metros cúbicos por hora.

O Aquífero Bauru é do tipo intergranular, associado a arenito e apresenta ampla capacidade de armazenamento de água, sendo um reservatório livre na maior parte de sua ocorrência, com excelentes condições de infiltração e recarga (Prandi, 2010). Na região de Araguaia, no Triângulo Mineiro, este aquífero é associado a cascalhos e areias e por isso apresenta vazões médias maiores do que na maior parte das demais áreas de ocorrência (Oliveira, 2002). Neste caso, suas águas são utilizadas para irrigação de lavouras de café.

Sistemas aquíferos da Província Centro-Oeste

Sistema Aquífero Bananal

Este sistema aquífero coincide com a bacia sedimentar do Araguaia-Bananal, dentro da bacia hidrográfica do Rio Araguaia, região que divide os estados de Mato Grosso, Goiás e Tocantins (Figura 9). Essa região é caracterizada por grandes planícies, lagunas, zonas alagadas intermitentes e vários cursos de rios meandantes (Rio Araguaia e afluentes). Entre as bacias sedimentares já citadas, essa é a bacia com menor espessura de sedimentos e mais recente na evolução geológica. Pois ainda está em processo de formação, recebendo continuamente sedimentos pelo Rio Araguaia e seus afluentes. Estudos de Araújo e

Carneiro (1977) apud Souza (2017) estimaram que em alguns pontos essa bacia pudesse atingir até 320 m de profundidade. Entretanto, um poço de pesquisa do Serviços Geológico do Brasil na região indicou profundidade de 50 m (Lacerda Filho et al., 1999). Entre os poços do SIAGAS foram observadas profundidades pouco maiores que 70 m na região de Jussara, GO.

Essa bacia é preenchida pela Formação Araguaia, que é composta de sedimentos aluviais (oriundos do rio) e lacustres (oriundos de lagoas) intercalados. Os sedimentos são representados predominantemente por areia, cascalho, silte e argila semiconsolidados e inconsolidados, com presença de concreções ferruginosas.

O banco de dados do SIAGAS (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022) conta com poucos poços na região do aquífero (dados de julho de 2021). Contudo, na região norte do aquífero os dados existentes indicam baixas capacidades produtivas dos poços e grandes rebaixamentos dos níveis de água (nível dinâmico) durante o bombeamento. Isso é um indicativo de que boa parte desses poços ultrapassa os sedimentos e captam água dos sistemas de aquíferos fraturados abaixo, em rochas cristalinas menos produtivas. Na região sul, no município de Jussara, GO, os poços indicaram boa capacidade produtiva e espessa camada de sedimentos. Neste contexto, para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas, visando simplificações, esse aquífero foi tratado como unidade indistinta, com espessura saturada média de 30 m e porosidade efetiva média de 12% (Tabela 3).

O Sistema Aquífero Bananal é um tipo de aquífero livre e relativamente vulnerável. Suas reservas hídricas funcionam de forma interconectada aos sistemas de águas superficiais que o compõem (Rio Araguaia e afluentes). Conseqüentemente, seu uso e gestão devem observar os impactos mútuos entre sistemas hídricos superficiais e subterrâneos. Na prática, o Sistema Aquífero Bananal é parte essencial de um ecossistema local, que envolve um equilíbrio mútuo de funcio-

namento e manutenção de diversas espécies locais e do próprio Rio Araguaia.

Tabela 3. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas do Sistema Aquífero Bananal.

Unidade aquífera	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Formação Araguaia	30,0	108.511,53	102.772,40	390,64	369,98

Sistema Aquífero Parecis

O Sistema Aquífero Parecis representa um reservatório subterrâneo do tipo intergranular composto por uma sucessão de arenitos, com intercalações de níveis pelíticos e conglomerados pertencentes ao Grupo Parecis. Em função da presença de níveis argilosos, podem ocorrer aquíferos classificados como livres ou confinados. Segundo Silva (2013), os limites definidos deste aquífero são coincidentes com a extensão das rochas do Grupo Parecis.

A área total de distribuição deste aquífero é de 227.290 km², sendo que 108.302 km² ocupam a área de ocorrência do bioma Cerrado. Considerando esta área de ocorrência, 15% de porosidade eficaz e uma espessura saturada média de 108 m a reserva permanente no Cerrado alcança 1.372,30 km³ de água.

Sistemas Aquíferos Urucuaia e Areado

Estes sistemas aquíferos integram a Bacia Sanfranciscana, que inclui as unidades sedimentares que compõem os reservatórios subterrâneos. Esta bacia tem uma área que ocupa partes de seis estados brasileiros incluindo o Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Goiás e Minas

Gerais. A Bacia Sanfranciscana (Urucuia e Areado) após evolução geológica e intensos processos erosivos ocupa atualmente uma área total de 151.158 km² e uma área efetiva de aquíferos menor, de 125.016 km² (Agência Nacional de Águas, 2017) (Tabela 4).

O Sistema Aquífero Urucuia tem 99,5% de sua área inserida no bioma Cerrado, enquanto o Sistema Aquífero Areado tem toda a sua área vinculada ao Cerrado. Estes aquíferos foram estudados por Gaspar (2006), Gaspar e Campos (2007) e Agência Nacional de Águas (2017), entre outros autores, e apresentam elevado potencial de produção de água, sendo utilizados inclusive para a irrigação de grandes lavouras pelo sistema de pivôs centrais.

Tabela 4. Dados dimensionais utilizados para o cálculo da reserva permanente dos sistemas aquíferos Urucuia e Areado.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Urucuia	14	128.356,32	127.595,71	1.327,97	1.320,10
Areado	10	22.802,17	22.802,17	104	104

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

O Sistema Aquífero Urucuia é representado majoritariamente por arenitos depositados em antigos desertos de areia, sendo, portanto, muito porosos e funcionando como excelente reservatório de água. Sua área de distribuição apresenta aquíferos livres, semiconfinados ou suspensos.

O Aquífero Areado é heterogêneo e contém principalmente arenitos, em menor proporção, conglomerados/folhelhos. Em muitos casos, os arenitos são cimentados, o que restringe parte de sua porosidade, e, por conseguinte, não apresentam um potencial aquífero muito elevado.

Outros Aquíferos

No contexto do Cerrado, conforme Figura 7, ainda existem aquíferos fraturados e os fissuro-cársticos com 38% e 2% respectivamente da área do Cerrado. Estes, junto às coberturas inconsolidadas intergranulares, representam os aquíferos menos expressivos em termos de volume das reservas de águas subterrâneas. Suas reservas também foram estimadas com base nos dados de poços do SIAGAS (Tabela 5).

Tabela 5. Dados e estimativas utilizadas para o cálculo das reservas dos aquíferos fraturados, fissuro-cársticos e das coberturas inconsolidadas intergranulares.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Média da espessura saturada (m)	Nº total de poços nas unidades	Nº total de poços usados na estimativa	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)
Coberturas	10	13,64	1.807	34	190.525,21	259,87
Fraturados	2	91,44	7.477	7.380	657.252,89	1.208,98
Fissuro-Cársticos	5	71,79	1.312	1.311	36.663,91	131,81

Sustentabilidade da exploração dos aquíferos no Cerrado

A sustentabilidade do bombeamento de águas subterrâneas deve levar em conta vários aspectos, incluindo o conhecimento do tipo de aquífero, as estimativas da disponibilidade hídrica, a taxa de bombeamento, a condição de circulação e recarga, o parâmetro climático, entre outros.

O aquífero, como reservatório, pode ser comparado a uma barragem ou um açude, com um volume de água armazenada e outro com reposição anual por meio da infiltração de águas pluviais. Há uma re-

serva permanente (volumes não renováveis) e uma reserva renovável (volume de água que anualmente entra nos aquíferos).

Se uma barragem é bombeada com uma vazão superior à entrada mais o volume acumulado, ela pode secar em um período variável de tempo, levando ao colapso do sistema para o abastecimento ou para irrigação. O mesmo pode ser dito para o aquífero: se o bombeamento for superior à recarga, haverá sua sobreexploração, ou seja, uma redução contínua dos níveis de água. Como um reservatório de superfície, o aquífero também pode se esgotar, como já ocorreu nos EUA (Alley et al., 1999; Galloway et al., 1999; Konikow, 2015), na China (Qiu, 2010) e na Índia (Bhattarai et al., 2021; Jain et al., 2021), onde a exploração excessiva dos aquíferos resultou em uma redução na produção agrícola e ameaçou a segurança alimentar.

No caso extremo de sobreexploração dos mananciais subterrâneos, além do esgotamento do aquífero, ocorrerão consequências nos recursos hídricos superficiais, incluindo a diminuição do fluxo e até o secamento de nascentes e córregos, principalmente em períodos prolongados de seca na região do Cerrado.

A determinação dos volumes que podem ser retirados dos aquíferos sem prejudicar os sistemas naturais não é uma tarefa simples e deve ser feita por especialistas (hidrogeólogos). Os volumes exploráveis geralmente estão associados às reservas renováveis, que por sua vez são maiores em aquíferos livres e vão diminuindo progressivamente com o aumento do confinamento dos aquíferos. Para avaliar esta questão, serão utilizados dois aquíferos localizados no noroeste de Minas Gerais, cobertos por vegetação típica do Cerrado, que são usados para irrigação de lavouras: o Aquífero Entre Ribeiros (Campos et al., 2022) e o Aquífero Batalha (Oliveira, 2018).

O Aquífero Batalha representa um reservatório do tipo intergranular, raso e livre, associado a areias, localizado em região elevada com médias de chuvas da ordem de 1,5 mil milímetro por ano. Portanto, a

renovação anual é alta e, mesmo considerando as elevadas vazões, os níveis potenciométricos permitem uma exploração sustentável no curto e médio prazo.

O Aquífero Entre Ribeiros é classificado como fissuro-cárstico, confinado e profundo, composto por rochas calcárias com pequena dissolução e argilosas fraturadas, sotoposta a uma camada espessa de rochas argilosas. Mesmo em áreas planas com solos espessos e chuvas abundantes (cerca de 1,4 mil milímetro por ano), a disponibilidade hídrica deste aquífero é menor devido à limitada renovação hídrica anual (recarga), já que as águas da chuva precisam atravessar toda a camada confinante antes de chegar ao reservatório em profundidade.

Apesar do conhecimento sobre os aquíferos, cálculos de reservas hídricas subterrâneas, comportamento das chuvas e outros aspectos relacionados ao armazenamento e recarga dos aquíferos, a sustentabilidade de sua exploração, especialmente para usos que requerem grandes volumes (como a irrigação de lavouras), depende do monitoramento dos níveis potenciométricos (níveis da água no aquífero). Para isso, é necessário realizar medições periódicas dos níveis de água nos próprios poços de produção ou em poços exclusivos de monitoramento.

Lembrando que, para o monitoramento ser efetivo nos poços de produção, é necessário que os poços estejam em repouso (sem bombeamento) nas 48 horas que precedem as medições.

Para que os poços de produção possam ser utilizados como poços de medição, eles devem ser equipados com um tubo piezométrico, ou seja, um tubo de pequeno diâmetro acoplado à tubulação edutora. O tubo piezométrico funciona como uma guia para a introdução do equipamento de medição. Poços de monitoramento geralmente têm um diâmetro menor (de duas ou quatro polegadas) e são dedicados exclusivamente às medições e coleta de amostras. Poços domésticos, como

cisternas, não devem ser usados para monitoramento, pois seus níveis de água variam continuamente devido à retirada da água.

Para se conhecer o aquífero e regularizar os poços (emissão de outorga de direito de uso), é fundamental que sejam realizados perfis litoestratigráficos (descrição dos materiais atravessados na perfuração), perfis construtivos (descrição da obra do poço) e testes de bombeamento/vazão. Portanto, na contratação da perfuração de um poço ou bateria de poços, é importante exigir da empresa perfuradora todos estes dados e documentos detalhados, incluindo a Anotação de Responsabilidade Técnica no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (ART/CREA).

Os perfis litoestratigráficos devem incluir uma descrição dos materiais interceptados a cada três metros de avanço da perfuração, incluindo tipos de rochas/solos, cor, tamanho dos fragmentos, velocidade de perfuração, presença de fraturas, presença de veios (quartzo ou carbonato), grau de alteração da rocha, entradas de água, trechos com desmoronamentos e outras características relevantes.

Os perfis construtivos devem apresentar informações importantes como os diâmetros de perfuração, a posição da coluna de revestimentos e filtros, a posição de colocação do pré-filtro, a profundidade de instalação da bomba, a capacidade e potência da bomba, o diâmetro do tubo edutor e demais equipamentos elétricos instalados.

Os testes de bombeamento são realizados por meio de diferentes métodos, como os contínuos (bombeamento em vazão constante) ou os escalonados (bombeamento com aumento progressivo de vazões). É importante medir a recuperação do nível de água ao final do teste, que geralmente tem duração de 24 horas para garantir que o nível volte à mesma elevação do início. É preciso destacar que o teste de vazão realizado com o compressor utilizado na perfuração não representa a vazão correta para uso do poço. O teste completo deve ser realizado com bomba submersível na fase final da conclusão da obra.

A avaliação da sustentabilidade da exploração dos aquíferos é importante não apenas do ponto de vista ambiental, mas também para garantir a sustentabilidade do investimento do usuário do poço (como agricultor ou irrigante). Em caso de escassez de água por sobreexploração de um aquífero local/regional, os usuários serão os primeiros prejudicados. Por isso, é fundamental realizar estudos específicos sobre as disponibilidades hídricas, condições de recarga e bombeamento antes da exploração dos aquíferos. O monitoramento é fundamental para garantir a confiabilidade dos estudos, já que os recursos hídricos subterrâneos apresentam incertezas sobre suas características e parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

Considerações finais

A região do bioma Cerrado inclui parte de grandes províncias hidrogeológicas brasileiras, além de aquíferos restritos a áreas específicas. Dentre as províncias destacam-se: Parnaíba, Paraná, Centro-Oeste (Bananal e Parecis) e São Francisco (Urucuaia e Areado). Entre os aquíferos de áreas isoladas com potencial para uso em sistemas agrícolas (irrigação), destacam-se: Bambuí, Entre Ribeiros e Batalha.

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos classificados como intergranulares, fraturados e cársticos, que podem ser livres ou confinados, de dimensões regionais ou locais.

As águas subterrâneas no bioma Cerrado são de fundamental importância para a complementação do abastecimento humano, tanto em cidades quanto em áreas rurais, e são utilizadas para irrigação de grandes lavouras, na indústria e até mesmo aproveitadas como mananciais termais para uso balneário (Campos, 2004; Almeida et al., 2006; Almeida, 2011; Junqueira, 2020).

Os recursos hídricos subterrâneos são importantes para a regulação do ciclo hidrológico na região do Cerrado, especialmente durante

os períodos prolongados de seca. Nesse sentido, os aquíferos ligados a solos espessos (principalmente latossolos) são extremamente relevantes para manter as descargas da rede de cursos superficiais.

Além da função ecológica de regulação e manutenção das águas superficiais, alguns aquíferos têm grande potencial para usos consuntivos de grandes demandas, como a irrigação. É importante destacar que o uso de aquíferos para esse fim só é viável em casos específicos em que os reservatórios subterrâneos tenham simultaneamente: grandes espessuras, elevadas porosidades e condições de renovação/recarga hídrica favoráveis.

A análise da viabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos e de sua sustentabilidade em longo tempo de bombeamento deve passar por estudos técnicos de caracterização dos aquíferos, estimativas das reservas hídricas subterrâneas, entendimentos das condições de circulação e dos volumes de recarga. Além disso, a exploração das águas subterrâneas deve ser acompanhada por monitoramento contínuo dos níveis potenciométricos do aquífero submetido ao bombeamento. Este procedimento é particularmente importante para os casos em que os aquíferos são aplicados para irrigação, já que esse tipo de uso requer o maior volume de água.

Uma ação de gestão que pode ampliar a sustentabilidade dos recursos hídricos é o uso de captação mista, ou seja, uso de captações tanto de águas superficiais quanto subterrâneas (em locais em que ambos os mananciais estão disponíveis). Assim, as vazões exploradas devem ser maiores nos cursos de águas superficiais ou em barragens no período das chuvas (quando a disponibilidade é maior) e o bombeamento dos poços deve ser aumentado no período de seca. Também é possível avaliar o regime de chuvas no período hidrológico anterior e, em anos de chuvas abaixo da média histórica, reduzir os volumes bombeados para minimizar as pressões sobre os aquíferos e evitar sua sobreexploração.

A recarga gerenciada ou artificial dos aquíferos é uma técnica importante para mitigar os problemas e melhorar a sustentabilidade no uso das águas subterrâneas. A recarga gerenciada ocorre a partir de técnicas conhecidas há mais de 60 anos e utilizadas em muitos países, como EUA, Índia, China, Alemanha, Itália, Austrália, entre outros (Dillon et al., 2019). No Brasil, o seu uso ainda é incipiente e tem sido aplicado apenas em pesquisas acadêmicas e em ações isoladas (Cadamuro; Campos, 2005; Montenegro et al., 2005; Almeida, 2011; Azevedo, 2012; Nunes, 2016).

A recarga gerenciada consiste na injeção planejada de água em um aquífero, usando estruturas dimensionadas para esse fim. Para evitar contaminações, a água injetada deve ter qualidade igual ou superior à água do aquífero que recebe a recarga.

Entre os impactos da exploração inadequada dos aquíferos utilizados para irrigação, destacam-se: (i) o rebaixamento exagerado dos níveis de água do aquífero, que em casos extremos pode secar poços, e o reservatório subterrâneo; (ii) o secamento de veredas, lagos, nascentes e cursos de água superficiais (principalmente aqueles com conexão hidráulica entre aquíferos e rios); (iii) recalques ou afundamentos da superfície do terreno, especialmente em locais com geologia composta por rochas calcárias; e (iv) contaminação das águas subterrâneas, decorrente da má qualidade construtiva dos poços e de inversões de fluxo pelo rebaixamento.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia**: proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo. Brasília, DF, 2017. 100 p.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E., FRANKE, O. L. **Sustainability of ground-water resources**. Denver, Colorado: U.S. Government Printing Office, 1999. 86 p. (U.S. Geological Survey Circular 1186).

ALMEIDA, L. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas-GO**. 2011. 153 f. Tese (Doutorado)- Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ALMEIDA, L. de; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 231 p. il. color. + 1 mapa. (Série Geologia e Mineração, 1).

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 536 p.

ARAÚJO, J. B.; CARNEIRO, R. G. **Planície do Araguaia, reconhecimento geológico-geofísico**. Belém: Petrobrás/RENOR, 1977. 11 p. (Relatório Técnico).

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. **Hidrogeology Journal**, v. 7, p. 317-336, 1999.

ARRAES, T. M. **Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ARRAES, T. M.; CAMPOS, J. E. G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-89, 2007.

BHATTARAI, N.; POLLACK, A.; LOBELL, B. D.; FISHMAN, R.; SINGH, B.; DAR, A.; JAIN, M. The impact of groundwater depletion on agricultural production in India. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 8, 085003, 2021.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Edição dos Autores, 2004. 214 p.

CADAMURO, A. L. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2005.

CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 34, v. 1, p. 41-48, 2004.

CAMPOS, J. E. G.; TELES, L. S. B.; MACHADO, A. M. A.; RODRIGUES, D. S. Caracterização do Aquífero entre Ribeiros, Município de Paracatu, Noroeste do estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22., 2022, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: ABAS, 2022.

COSTA, W. D. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM/ REFO: LABHID-UFPE, 2000. p. 341-367.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo** (Escala 1: 1.000.000. Sistema de Informações Geográficas-SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB). Brasília, DF, 2010.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 4 jul. 2022.

CUTRIM, A. O.; SALOMÃO, F. X. T.; LUZ, J. A. G. Avaliação da vulnerabilidade à poluição da água subterrânea urbana, usando o método SI em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil. **Geociências**, v. 40, p. 195-205, 2021.

DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHEK, T.; LLURIA, M.; PYNE, R. D. G.; JAIN, R. C.; BEAR, J.; SCHWARZ, J.; WANG, W.; FERNANDEZ, E.; STEFAN, C.; PETTENATI, M.; VAN DER GUN, J.; SPRENGER, C.; MASSMANN, G.; SCALON, B. R.; XANKE, J.; JOKELA P.; ZHENG, Y.; ROSSETTO, R.; SHAMRUKH, M.; PAVELIC, P.; MURRAY, E.; ROSS, A.; BONILLA VALVERDE, J. P.; PALMA NAVA, A.; ANSEMS, N.; HA, K.; MARTIN, R.; SAPIANO, M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 27, p. 1-30, 2019.

FEITOSA, A. C. F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM/ LABHID, 2008. 812 p.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. O Vale do Gurgueia: uma zona estratégica de produção de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18., 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: ABAS, 2012.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. Ney York: MacMillan College, 2004. 619 p

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New York: Prentice Hall, 1979. 604 p.

GALLOWAY, D. L.; JONES, D. R.; INGEBRITSEN, S. E. (ed). **Land subsidence in the United States**. Denver: U.S. Geological Survey, 1999. 177 p. (Circular, 1182).

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, S. S.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. [São Paulo]: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

IBGE. **Mapa de Solos do Brasil, 1:250.000**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil, Períodos de 1961-1990 e de 1991**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 17 out. 2022

JAIN, M.; FISHMAN, R.; MONDAL, P.; GALFORD, G. L.; BHATTARAI, N.; NAEEM, S.; LALL, U.; DEFRIES, R. S. Groundwater depletion will reduce cropping intensity in India. **Science Advances**, v. 7, n. 9, 2021. DOI:10.1126/sciadv.abd2849.

JUNQUEIRA, T. P. **Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO): estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos**. 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

KONIKOW, L. F. Long-term groundwater depletion in the United States. **Ground Water**, v. 53, n. 1, p. 2-9, 2015. DOI:10.1111/gwat.12306.

LACERDA FILHO, J. V.; REZENDE, A.; SILVA, A. **Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: CPRM; METAGO; UnB, 1999. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. A.; CAVALCANTI, G. L.; MOURA, A. E. S. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na planície do Recife (PE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 5., 2005, Teresina. **Anais...** Feira de Santana: ABCMAC, 2005. 10 p.

NUNES, M. D. X. **Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, G. N. R.; CAMPOS, J. E. G.; GOMES, A. W.; MOURA, F. G. Caracterização hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 36700, 2021.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. 20009. 188 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília, DF.

- PRANDI, E. C. **Gestão integrada das águas das unidades estratigráficas do Aquífero Bauru nas Bacias dos Rios Aguapeí e Peixe**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.
- QIU, J. China faces up to groundwater crisis. **Nature**, v. 466, n. 308, 2010. <https://doi.org/10.1038/466308a>.
- SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. **Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores**. Brasília, DF: CPRM, 2003. 31 p.
- SILVA, T. M. G. **Caracterização do Sistema Aquífero Parecis na região Centro-Norte do estado de Mato Grosso**: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- SOUSA, E. M. D. **Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do Bananal e reativações Transbrasilianas**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- USGS. **Ground water and surface water: a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey, 1998. 79 p. (Report 1139 Circular). DOI: 10.3133/cir1139.

CAPÍTULO 6

Massas de Água no Cerrado

Níckolas Castro Santana

Lineu Neiva Rodrigues

Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1, 2 e 3); Wardsson L. Borges (da esquerda para a direita - 4); Daniel Medeiros (primeiro plano).



Introdução

As massas de água existentes no Cerrado, como lagos, lagoas, açudes, represas, reservatórios e trechos de rios são reservas hídricas importantes para o desenvolvimento dessa região. Reservatórios artificiais e barragens são intervenções hídricas que visam a acumulação de volume de água para diferentes fins e usos.

O Brasil possui 240.899 massas de água, incluindo lagos, lagoas, barragens e segmentos de rios, das quais 27,6% são de origem natural e 72,4% são artificiais (Agência Nacional de Águas, 2020). Os usos principais são para irrigação, hidroeletricidade, abastecimento humano e contenção de rejeitos de mineração. Os maiores volumes de água estão armazenados nos reservatórios para geração de energia hidrelétrica, onde três bacias hidrográficas, todas com nascentes no Cerrado, respondem por mais de 87% do volume total: Bacia do Paraná, Tocantins-Araguaia e São Francisco (Agência Nacional de Águas, 2020; Rodrigues; Althoff, 2021).

No caso específico da agricultura irrigada, as pequenas barragens são as mais relevantes, uma vez que se constituem em infraestruturas estratégicas para o desenvolvimento do setor. Elas armazenam o excesso de água durante a estação chuvosa para suprir a deficiência hídrica durante a seca, quando a demanda é geralmente maior que a oferta. Em regiões onde a disponibilidade hídrica é muito variável durante o ano, as pequenas barragens são estruturas essenciais para viabilizar a prática da irrigação e, conseqüentemente, manter a qualidade de vida das pessoas no meio rural (Rodrigues; Althoff, 2021).

Mapeamento das massas de água no Cerrado

O mapeamento das massas de água existentes no Cerrado é estratégico para o gerenciamento de recursos hídricos dessa região e para o

desenvolvimento de estratégias de segurança hídrica e alimentar para o Brasil. Para caracterizar a distribuição espaço-temporal de massas de água no Cerrado (pequenos e grandes reservatórios naturais e antrópicos, incluindo água em áreas de mineração), foram utilizados dados do Projeto MapBiomass dos anos de 1985 e 2021 (MapBiomass, 2022).

O projeto MapBiomass é uma iniciativa multi-institucional que envolve universidades federais públicas, empresas privadas e organismos não-governamentais para a produção de diversos mapas temáticos como mapas anuais de uso e cobertura de terras do Brasil, cicatrizes de queimadas, desmatamentos para fins de fiscalização e dinâmica da água superficial. Os dados básicos desse projeto são as séries históricas de imagens do satélite Landsat, as quais são processadas em nuvem na plataforma da Google Earth Engine e complementadas com outras imagens de alta resolução espacial e temporal, notadamente as imagens do satélite PlanetScope, com resolução espacial de 3 m e periodicidade diária.

Em relação aos seis biomas brasileiros, o Cerrado ocupa o quarto lugar em termos de extensão total de água superficial, com um total de 1.356.738 ha, atrás dos biomas Amazônia (10.229.270 ha), Mata Atlântica (2.043.318 ha) e Pampa (1.787.571 ha) (Figura 1). No Cerrado, destacam-se os grandes reservatórios para geração de energia hidrelétrica instalados nas bacias do Rio Tocantins, Rio Paranaíba e Rio Grande. Apesar dessa relativamente modesta contribuição do Cerrado no cenário nacional, é importante ressaltar que o Cerrado desempenha um importante papel no processo de distribuição de recursos hídricos para outros biomas devido à sua localização em regiões de altitudes elevadas.

Analisando a Figura 2, observa-se uma tendência de aumento expressivo na área ocupada por águas superficiais no bioma Cerrado no período 1985–1991, porém, com uma tendência de redução gradativa e consistente a partir de 2009. No período 1985–2021, houve uma perda de quase 1,5 milhão de hectares de água superficial no bioma Cerrado.

A figura mostra alguns picos de aumento significativo na área ocupada por águas superficiais no Cerrado, principalmente durante a década de 1990, o que pode ser explicado pelo enchimento de reservatórios destinados à geração de energia hidrelétrica. Por exemplo, o aumento expressivo verificado em 1999 coincide com o enchimento do reservatório de Serra da Mesa no norte do estado de Goiás, iniciado em 1997.

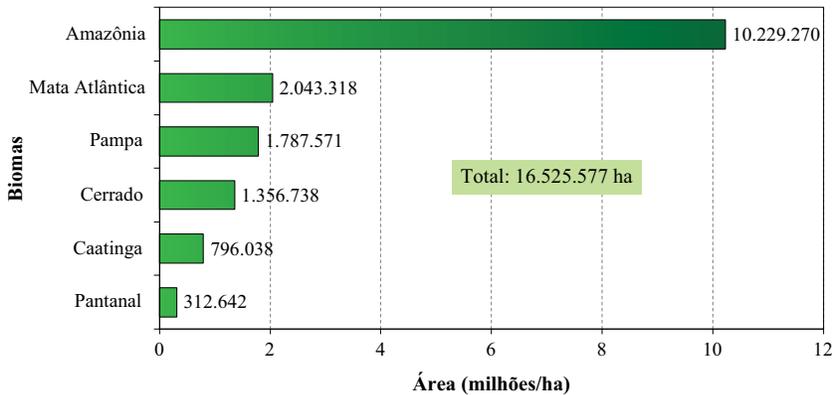


Figura 1. Área ocupada por águas superficiais nos diferentes biomas brasileiros em 2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

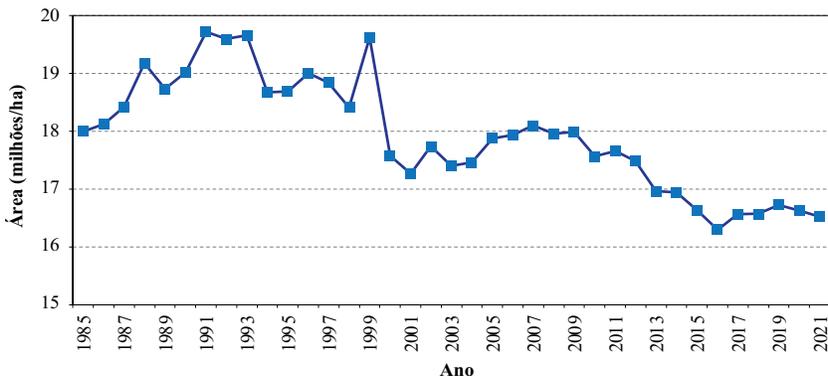


Figura 2. Variação temporal da área ocupada por águas superficiais no bioma Cerrado para o período 1985–2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

O balanço de perda e ganho de água superficial no bioma Cerrado no período 1985–2021 é negativo (-68.293 ha) (Figura 3), indicando que há um número acentuado de rios e lagos que eram perenes em 1985 e acabaram secando em 2021. Conforme ressaltado anteriormente, os ganhos estão relacionados principalmente com a construção de reservatórios para geração de energia hidrelétrica, armazenamento de rejeitos de mineração e irrigação agrícola.

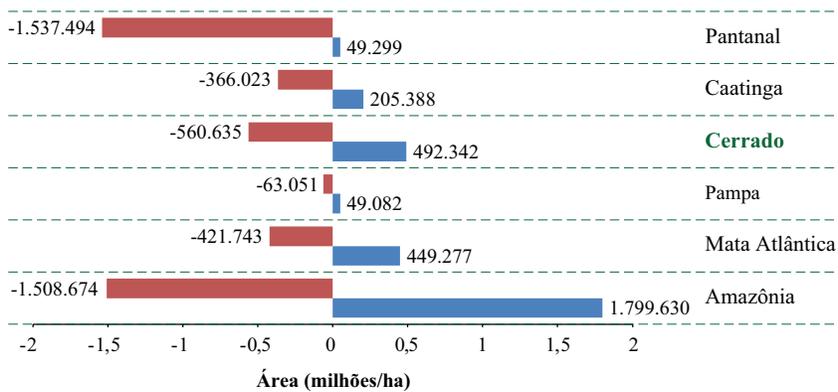


Figura 3. Comparação de perda (em vermelho) e ganho (em azul) de água superficial no bioma Cerrado em relação aos outros biomas brasileiros no período 1985–2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

Foram identificadas cerca de 59 mil massas de águas individuais no Cerrado, compostas de lagos e lagoas naturais (mais de 60%), barragens artificiais para uso agrícola, abastecimento humano e contenção de rejeitos de mineração (cerca de 39%) e barragens para usinas hidrelétricas (menos de 1%) (Figura 4).

As massas de água classificadas como artificiais somam 72,4% da área total de 45.583,76 km², sendo a maioria (92%) com área superficial menor ou igual a 10 ha.

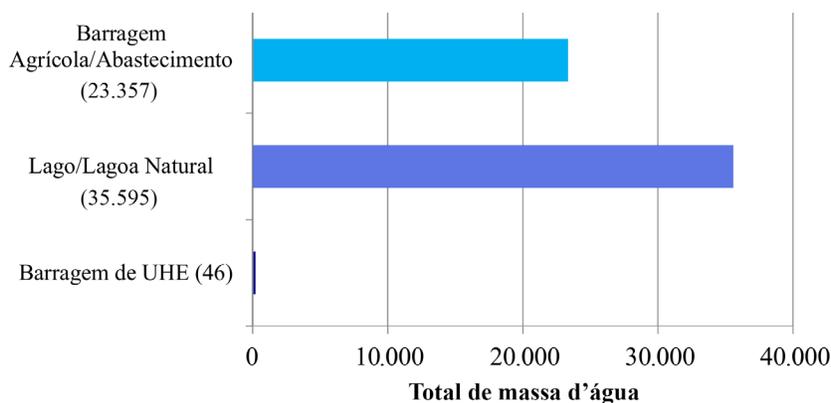


Figura 4. Número total de massas de água por tipo de armazenamento.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

Apesar do número expressivo de lagos e lagoas naturais, sua área total média é a menor, cerca de 4 ha. As barragens agrícolas artificiais possuem uma área média de cerca de 7 ha, enquanto as barragens de usinas hidrelétricas possuem, em média, mais de 16 mil hectares (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas gerais para a área em hectares de cada tipo de massa de água no Cerrado.

Tipo	Mínimo (ha)	Máximo (ha)	Média (ha)	Desvio padrão (ha)
Barragem agrícola/abastecimento	0,001	6.204	7	74
Lago/lagoa natural	< 0,0001	2.536	4	49
Barragem de usina hidrelétrica	154	96.906	16.484	21.820

Em todo o Cerrado, mais de 10 mil quilômetros quadrados foram classificados como massas de água com represamento. Dessa área total, 75% foram definidas como barragens de usinas hidrelétricas (UHE),

17% como barragens para uso agrícola, abastecimento humano e contenção de rejeitos de mineração, assim como 8% como lagos e lagoas naturais (Figura 5). Apesar de possuírem um número menor de massas de água individuais, as barragens de usinas hidrelétricas são as principais responsáveis pelo armazenamento de água no Cerrado.

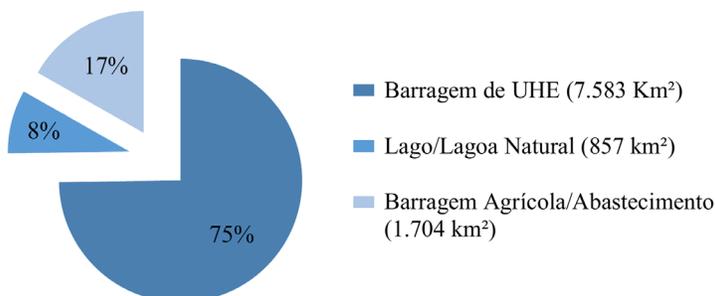


Figura 5. Área total de massas de água com represamento no Cerrado no ano de 2019.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

Foram identificadas 46 massas de água de represas de usinas hidrelétricas, considerando apenas a área inserida no Cerrado, em casos de limites com outros biomas. Dentre essas, a menor é a de São Domingos, localizada no município de São Domingos, GO, com cerca de 154 ha de área inundada, e a maior a de Três Marias, localizada no município de Três Marias, MG, com cerca de 97 mil hectares de área inundada (Figura 6). No quesito geração de energia, a maior é a de Marimbondo, no Rio Grande, MG, com capacidade de potência nominal geradora das turbinas de até 1.440 MW, seguida pela usina de Serra da Mesa, no Rio Tocantins, GO, com capacidade de potência nominal geradora das turbinas de até 1.275 MW.

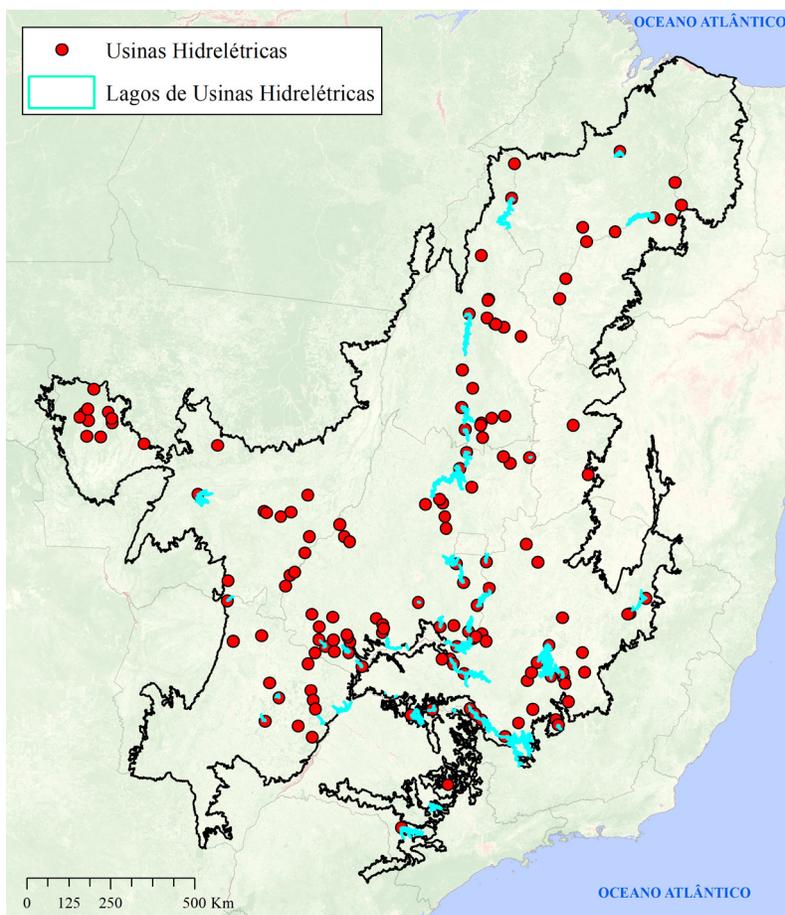


Figura 6. Localização das usinas hidrelétricas do Cerrado e os seus respectivos lagos no ano de 2019.

Nota: A área dos lagos apresentada na figura foi aumentada para facilitar a visualização. Somente lagos com mais de 900 m² de largura foram incluídos.

Fonte: Adaptado de MapBiomas (2019) e Agência Nacional de Energia Elétrica (2020).

Os municípios do Cerrado seguem padrões distintos com relação à localização de lagos naturais e barragens, especialmente as destinadas para irrigação. Os municípios com maior área total de lagos

e lagoas naturais são Santo Amaro do Maranhão e Barreirinhas, ambos no Maranhão, com 54,5 km² e 43,1 km², respectivamente, na região do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (Figura 7). Outra região com muitas lagoas naturais é a planície do Rio Araguaia, destacando-se o município de Cocalinho, MT, que possui a maior área total de massas de água naturais (cerca de 28 km²).

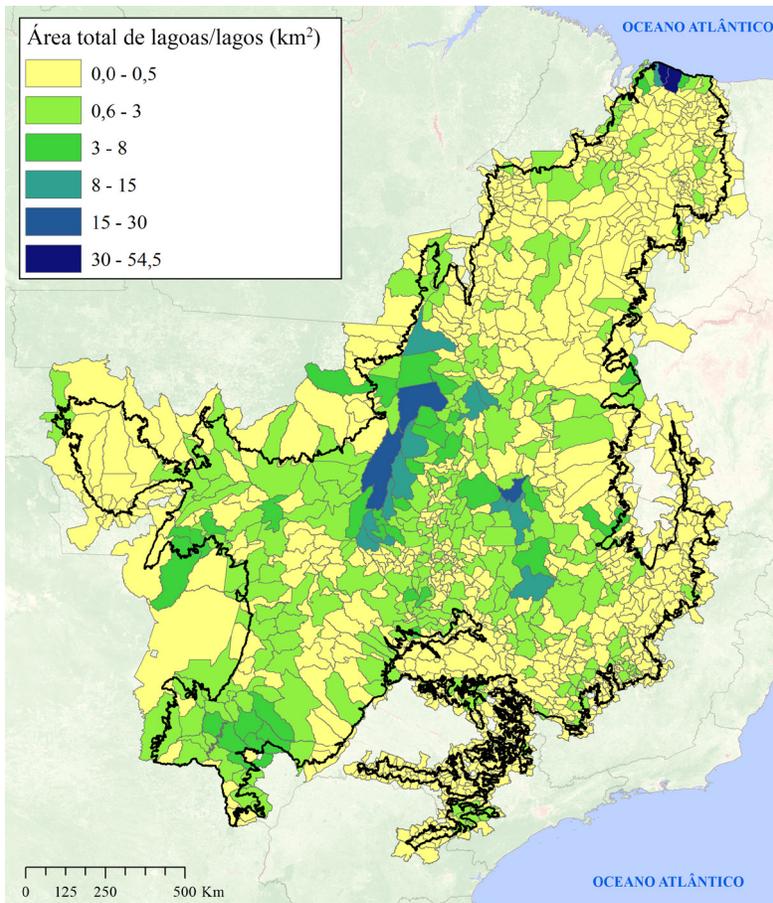


Figura 7. Área total (km²) de lagoas e lagoas naturais por município do Cerrado.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

O município com maior área total de barragens artificiais, excluindo-se as destinadas para geração de energia hidrelétrica, é o Formoso do Araguaia em Tocantins, com cerca de 65,23 km², compostas de grandes áreas inundadas para cultivo de arroz, além de diversas barragens para uso agropecuário em geral. A região que engloba a cidade de Brasília no Distrito Federal, Cristalina, em Goiás, e Unaí e Paracatu, em Minas Gerais, forma o principal complexo de áreas irrigadas no Cerrado, com barragens utilizadas principalmente para atender à irrigação por pivô central.

Brasília possui a segunda maior área de barragens, com cerca de 57,91 km², compostas principalmente por barragens para abastecimento humano, mas também por áreas utilizadas para irrigação. O município de Cristalina apresenta a terceira maior área de barragens, com 33,69 km², sendo a maior parte utilizada para irrigação (Figura 8).

Área ocupada por barragens artificiais

Analisando a Figura 9, observa-se que grande parte dos municípios apresenta uma pequena área ocupada por barragens, com menos que 1 km² no total. Os municípios considerados "outliers" são Formoso do Araguaia, TO, com 65 km² de área de barragens; Brasília, DF, com 57 km² de área de barragens; e Cristalina, GO, com 33,7 km² de barragens, conforme relatado no parágrafo anterior.

A partir da análise do percentual de áreas ocupadas por barragens artificiais em cada município (Figura 10), excluindo-se as destinadas para usinas hidrelétricas, foram identificados três municípios com as maiores porcentagens: Nerópolis, GO, com cerca de 14%, Taquaral, SP, com cerca de 13% e Taquarivaí, SP, com cerca de 12%. Esses municípios não são destaque na agricultura irrigada, mas por terem área to-

tal pequena, acabam apresentando alta porcentagem do seu território coberto por barragens.

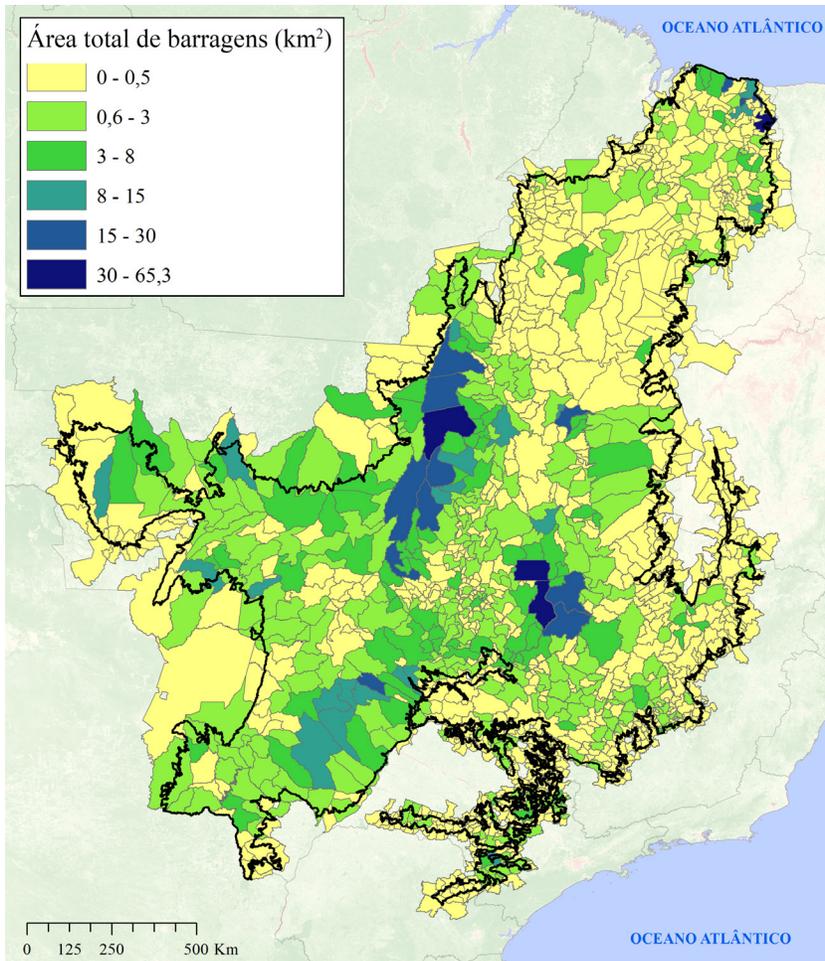


Figura 8. Área total (km²) de barragens, excluindo-se barragens de usinas hidrelétricas.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

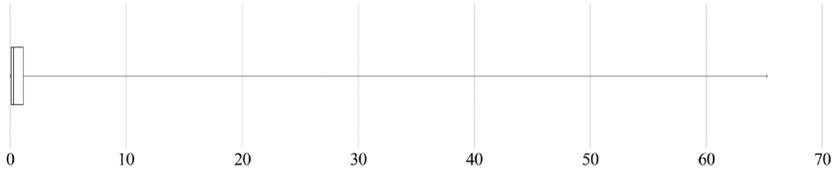


Figura 9. Boxplot do total de barragens (km²) por município.

Fonte: Elaborado a partir de dados do MapBiomias (2019).

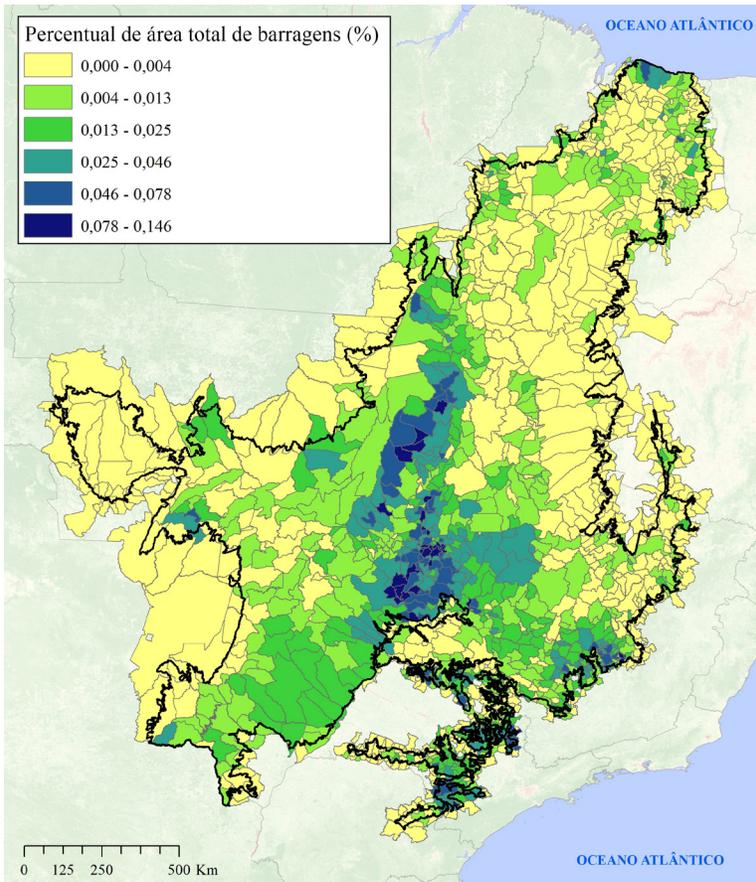


Figura 10. Percentual da área ocupada por barragens em cada município.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

Na Figura 11, é apresentada a área total ocupada por barragens antrópicas no Cerrado, podendo ser observada a alta concentração de pequenas barragens.

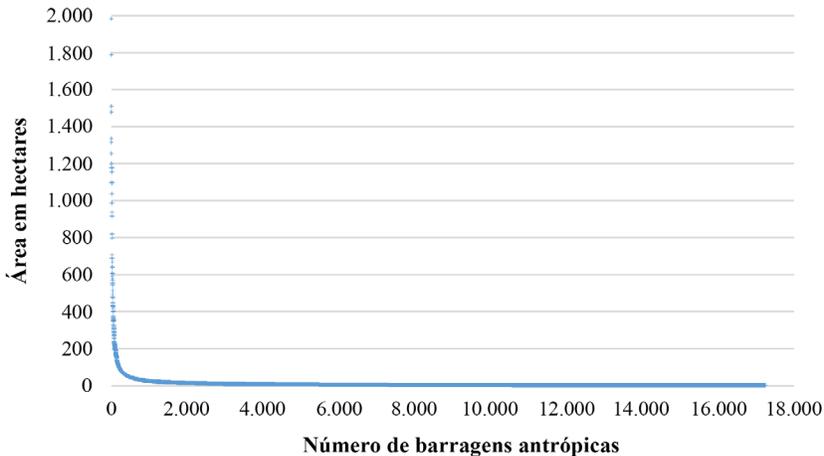


Figura 11. Área total ocupada por barragens antrópicas no Cerrado. Para facilitar a visualização, foram selecionadas apenas barragens com área entre 2 ha e 2.000 ha.

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

Volume armazenado e evaporação

Com base na equação $V = 0.019 A^{1.1762}$ proposta por Pinhati et al. (2020), foram calculados os volumes armazenados nas barragens. As barragens de usinas hidrelétricas não foram consideradas. Os volumes das barragens antrópicas analisadas variaram entre 0,00007 hm³ até 549,112 hm³, com média de 0,33 hm³ e mediana de 0,02 hm³. O total de volume de água acumulado nas barragens do Cerrado foi de 7.799,33 hm³. Se somado o valor das barragens de usinas hidrelétricas, chega-se em um volume de 170.480,70 hm³, havendo ainda cerca de 12.043,50 hm³ de água armazenada em lagos e lagoas naturais.

Quanto à evaporação anual, estimada pelo método do coeficiente de tanque (Althoff et al., 2019), as lagoas e os lagos naturais apresentaram a maior amplitude média de evaporação, assim como de desvio padrão (Tabela 2), enquanto as barragens agrícolas/abastecimento apresentaram a menor taxa média de evaporação, assim como de desvio padrão.

Tabela 2. Estatísticas referentes a evaporação média anual (mm), considerando cada tipo de massa de água no Cerrado.

Tipo	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Lago/lagoa natural	1.031,1	1.539,3	1.348,5	146,1
Barragem agrícola/abastecimento	1.135,0	1.338,0	1.237,1	67,6
Barragem de usina hidrelétricas	1.087,7	1.417,4	1.259,2	78,0

Referências

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D.; BAZAME, H. C. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian savanna. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 105-112, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: Relatório Pleno / Agência Nacional de Águas. Brasília, DF, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Usinas Hidrelétricas**. 2020.

PINHATI, F. S. C.; RODRIGUES, L. N.; SOUZA, S. A. Modelling the impact of on-farm reservoirs on dry season water availability in an agricultural catchment area of the Brazilian savannah. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106296, 2020.

MAPBIOMAS. **MapBiomas Água**. Disponível em: <https://plataforma.agua.mapbiomas.org/map/-8.139086/-45.321527/5.0/biome /3/biome/water/2021/2021>. Acesso em: 5 ago. 2022.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas**. Coleção [5] da Série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 31 out. 2022.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D. Pequenas barragens na agricultura irrigada. In: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (ed.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil**: história, política pública, economia e recurso hídrico. Piracicaba: ESALQ/USP, 2021. p. 447-461.

CAPÍTULO 7

Agricultura Irrigada no Cerrado

Diego Bispo dos Santos Farias

Lineu Neiva Rodrigues



Fotos: Lineu Rodrigues (da esquerda para a direita - 1 e 2); Cristiano Del Nero (da esquerda para a direita - 3); Fernando Tangerino (da esquerda para direita - 4); Paulo Lanzetta (primeiro plano).



Introdução

Há cerca de 6 mil anos, na Mesopotâmia, região que hoje compreende o Iraque e parte do chamado Crescente Fértil, colonos construíram canais e desviaram a água do Rio Eufrates para suas plantações, iniciando a prática da irrigação (Roux, 1993).

A irrigação transformou a terra e a sociedade como nenhuma outra atividade havia feito até então. Aquela ação viabilizou uma produção confiável de alimentos e possibilitou que parte das pessoas pudesse trabalhar em atividades diferentes da agricultura. Similarmente, têm-se registros de outras sociedades em regiões diferentes do planeta que foram dependentes da irrigação, como: Vales do Rio Indo, no Paquistão, do Rio Amarelo, na China e Rio Nilo, no Egito. Posteriormente, há evidências de culturas que cresceram com base na irrigação em várias partes do mundo, como, por exemplo, no México e na costa do Peru (Hoffman; Evans, 2007).

Ao longo do tempo, o uso da irrigação passou por vários processos de desenvolvimento e hoje é uma tecnologia indispensável em qualquer estratégia ou política de estado que vise a segurança alimentar e o combate à fome e à pobreza. Embora tenha se verificado, na última década, um aumento progressivo na produção de alimentos, esse crescimento deverá ainda ser maior para suprir o aumento de demanda previsto para uma população que, em 2050, será de aproximadamente 10 bilhões de habitantes (FAO, 2017; United Nations, 2017; Ramankutty et al., 2018).

O Brasil se sobressai como produtor e exportador de várias commodities agrícolas. É um dos maiores produtores mundiais de alimento, respondendo por 7,3% das exportações agrícolas mundiais (FAO, 2014; Allen; Valdes, 2016; Meade et al., 2016). O Cerrado, que ocupa cerca de 24% do território brasileiro, é responsável por cerca de 70% da produção nacional de grãos e carne bovina (Klink, 2014; Silva et al., 2015), podendo ajudar a suprir parte do aumento da demanda

de alimentos projetada. A produção de alimentos na região do Cerrado está cada vez mais dependente da irrigação, que se apresenta como o melhor seguro agrícola para o produtor.

Uso da água na agricultura irrigada

A água é fundamental para a produção de alimentos. Estima-se que cada caloria de alimento produzido pela planta requer, em média, cerca de um litro de água. Na Figura 1, apresentam-se os valores médios de uso de água no mundo, bem como nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (World Water Week, 2006). Analisando a Figura 1, nota-se que, da quantidade total de água que é retirada para algum uso, 70% é utilizado para fins agrícola. Nos países em desenvolvimento, o uso agrícola representa 59% do total e 82% nos países em desenvolvimento.

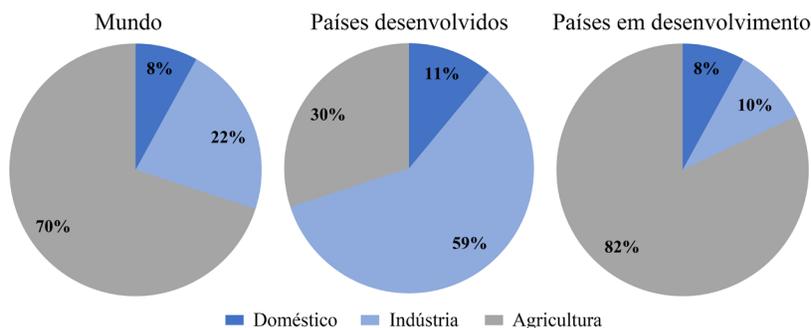


Figura 1. Uso da água por setor doméstico, industrial e agrícola no mundo, nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento.

Fonte: Adaptado de World Water Week (2006).

No Brasil, a porcentagem média de uso de água, em relação ao total de retiradas, é de aproximadamente 50% para irrigação, 16% para indústria e 26% para abastecimento humano (Agência Nacional de Águas, (Brasil) 2021). Esses valores podem variar temporalmente e en-

tre regiões, refletindo as diferenças nos padrões climáticos e socioeconômicos entre os estados (OCDE, 2015).

O percentual referente à agricultura irrigada é significativo, mas, em valor absoluto, comparado com a vazão média natural de longo período, é muito pequeno, representando apenas 0,47%. Isso indica que os recursos hídricos são pouco utilizados no Brasil. Para a gestão de recursos hídricos, entretanto, a retirada de água para fins de irrigação é um componente importante do balanço hídrico e, por isso, deve ser contabilizada e considerada nos planos de bacias hidrográficas (Rodrigues; Domingues, 2017).

Analisando o uso de água para irrigação no Brasil, observou-se, em 2019, uma vazão retirada de $965 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, equivalente a $30,4 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A cultura do arroz irrigado foi responsável por aproximadamente 38% das retiradas (Agência Nacional de Águas (Brasil), 2021). Vale ressaltar que as técnicas de manejo adotadas pelos produtores influenciam na sazonalidade do uso da água, como é o caso dos períodos em que não se pode cultivar soja devido ao vazio sanitário imposto pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) para controlar a ferrugem asiática.

Área irrigada e área com potencial para crescimento da irrigação

De acordo com FAO (2019), mais de 340 milhões de hectares foram equipados para irrigação em todo o mundo. Em 2019, os países com as maiores áreas irrigadas foram a China e a Índia, representando, respectivamente, 22,1% e 20,7% da área total irrigada no mundo (Figura 2). Em todo o mundo, estima-se que apenas 20% de todas as terras cultivadas sejam irrigadas e, ainda assim, produzem 40% de todos os alimentos.

Segundo informação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico em 2021, o Brasil possuía uma área irrigada de cerca de 8,2 milhões de hectares, correspondendo a 2,41% da área mundial equipada

para irrigação (Figura 2). Com essa área, o Brasil ocupava, naquele ano, a sexta posição entre os dez países de maior área equipada para irrigação. Fazendo um comparativo, o Paquistão, nesse mesmo ano, possuía 36,6 milhões de hectares plantadas e 54,6% dessas áreas eram equipadas para irrigação, enquanto o Brasil possuía o equivalente a 45,8% a mais de área plantada e apenas 15,4% dessas áreas eram equipadas para irrigação (FAO, 2019; Agência Nacional de Águas, 2021).

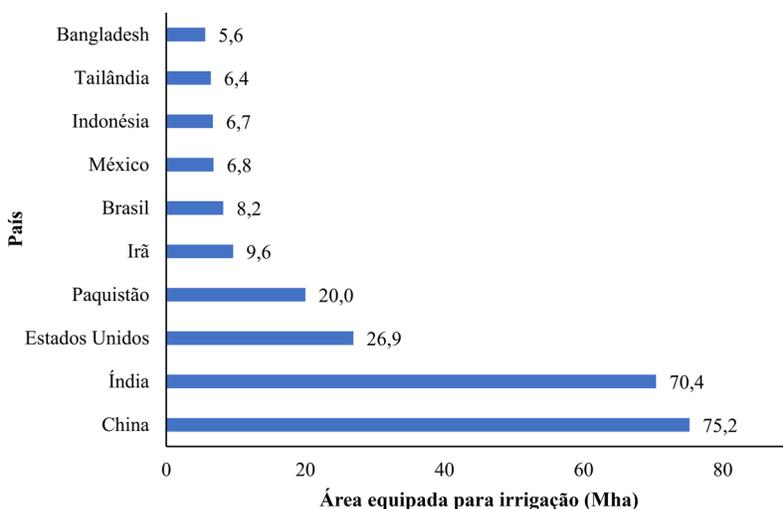


Figura 2. Dez países com as maiores áreas equipadas para irrigação no mundo.
Fonte: Elaborado a partir de dados da FAO (2019).

O levantamento realizado em 2020 pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ) indicou um crescimento de 249.225 ha na área irrigada, em relação a 2019. Com base nesse levantamento, o Brasil, em 2020, possuía uma área irrigada equivalente a 6,5 milhões de hectares, valor 20,7% menor que o valor obtido apresentado pela ANA (Agência Nacional de Águas, 2021). No comparativo entre os anos de 2019 e 2020, o crescimento da área irrigada foi de 19,0%, segundo dados da ABIMAQ.

Na Figura 3, apresentam-se os valores de áreas irrigadas para cada estado da Federação ((Agência Nacional de Águas, 2021). O valor de 8,2 milhões de hectares irrigados correspondia a 9,8% da área plantada em 2020 (IBGE, 2020). São Paulo foi o estado com maior área irrigada, irrigando aproximadamente 27% da área plantada (2,4 milhões de hectares) (IBGE, 2020). Os estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul ocuparam a segunda e terceira posição, respectivamente, no ranking de maiores áreas irrigadas no Brasil, com 1,14 milhões de hectares e 1,13 milhões de hectares (Agência Nacional de Águas, 2021), representando 19,5% e 11,8% das áreas plantadas nesses estados, respectivamente (IBGE, 2020).

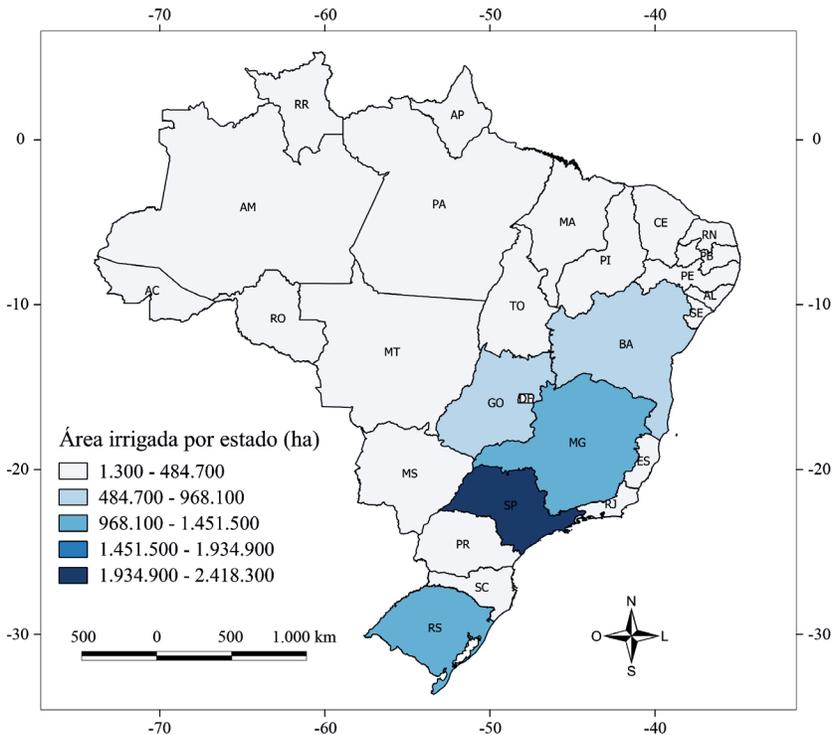


Figura 3. Área irrigada por estados brasileiros em 2021.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Água (2021).

Na Figura 4, apresenta-se a evolução da área irrigada no Brasil a partir de 1991. Observou-se um incremento de área equivalente a 5,5 milhões de hectares entre 1991 a 2019. O relatório da ANA indica um crescimento na área irrigada de aproximadamente 4,2 milhões de hectares até 2040, o que corresponde a um aumento de 79% (Agência Nacional de Águas, 2021). Considera-se esta estimativa de crescimento muito conservadora frente ao potencial do país.

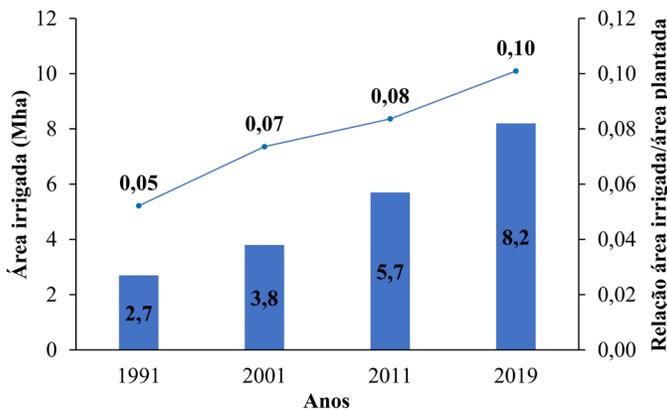


Figura 4. Evolução da área irrigada no Brasil no período 1991–2019.

Fonte: Elaborado a partir de dados da FAO (2019).

É notório o crescente desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil. Vale ressaltar que esse crescimento também é impulsionado pelo surgimento de novas fronteiras agrícolas, como, por exemplo, a região do Matopiba, que possui a maior parte da sua extensão localizada dentro do bioma Cerrado. O Cerrado é responsável por 2,3 milhões de hectares irrigados no Brasil (Figura 5).

A agricultura irrigada no Cerrado representa 64% da irrigação praticada no Brasil (Brasil, 2014), concentrando 80% dos pivôs centrais do país (Althoff; Rodrigues, 2019). Segundo esses autores, a região, de 2000 a 2017, apresentou um crescimento médio de área irrigada de 43 mil hectares por ano. Já no período de 2010 a 2017, a região apresen-

tou um crescimento equivalente a 56 mil hectares por ano. Utilizando esse último valor como referência, observa-se que a área irrigada na região atingirá 3 milhões de hectares por volta de 2050.

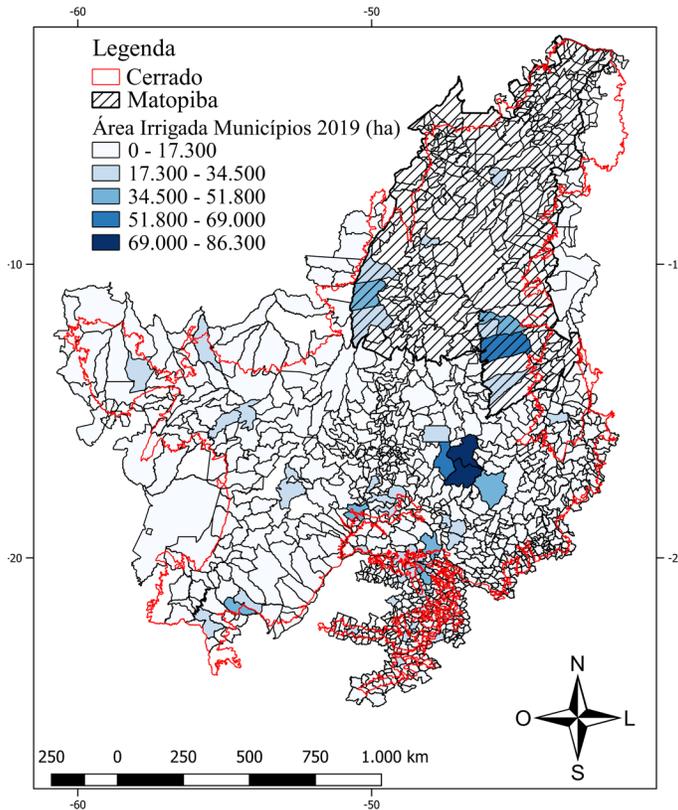


Figura 5. Área irrigada em municípios que se localizam totalmente ou parcialmente no bioma Cerrado, com destaque para a região do Matopiba.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021) e Embrapa (2014).

Considerando as informações apresentadas no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas, 2021), observa-se que, dos 4,1 milhões de hectares irrigados no Cerrado, os métodos de irrigação predominantes foram aspersão – outros (14%), aspersão – pivôs centrais (29%), locali-

zada (19%), superficial (4%) e outros sem predominância (34%) (Figura 6). O pivô central foi o sistema de irrigação que mais cresceu na região do Cerrado, sendo responsável por aproximadamente 40% do total do aumento anual dos sistemas de irrigação nas últimas duas décadas (Agência Nacional de Águas, 2021). Essa expansão deve-se principalmente ao seu grau de automação, uniformidade de aplicação de água e facilidade de operação, além das condições ambientais favoráveis do Cerrado.

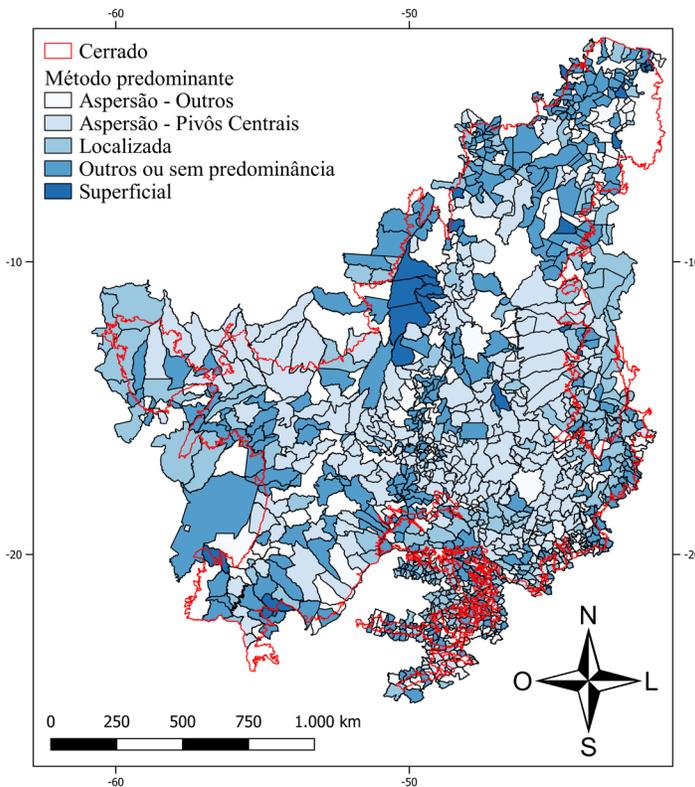


Figura 6. Métodos de irrigação predominantes na região do Cerrado brasileiro.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

O estudo apresentado no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas, 2021) mostrou que a área potencial de expansão da agricultura irrigada no Brasil é de aproximadamente 55,85 milhões de hectares. Cerca de 95,6% desse potencial de expansão deve ocorrer em áreas de sequeiro e em áreas de pastagens potencialmente irrigáveis. Esse mesmo estudo indicou que o Brasil possui potencial efetivo, isto é, áreas em condições mais favoráveis de desenvolvimento da agricultura irrigada, de 13,7 milhões de hectares, com 45% desse potencial localizado no Centro-Oeste, especialmente em Mato Grosso e Goiás e em maior parte no bioma Cerrado (Figura 7A).

A área irrigada atual e o potencial efetivo de irrigação do Brasil são apresentados na Figura 7B. O potencial efetivo leva em consideração as características do solo-relevo e a infraestrutura (energia, transporte rodoviário e ferroviário e capacidade de armazenamento de produtos agrícolas). Esse indicador explicita, de forma mais precisa, as potencialidades de curto e médio prazo de crescimento da irrigação no território brasileiro e correspondem às áreas de intensificação sobre agricultura de sequeiro e que apresentam aptidão de solo-relevo média ou alta.

O potencial de expansão de áreas irrigadas (total e efetivo) apresentado no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas, 2021) deve ser analisado com cautela para que o desenvolvimento da agricultura irrigada na região não seja limitado. Essa informação é útil para o planejamento geral, zoneamentos e monitoramento do setor. No entanto, particularidades locais, expansão da infraestrutura e obras de infraestrutura hídrica podem alterar a estimativa de área adicional irrigável, especialmente quando a oferta de água é aumentada devido a transferências de outras bacias ou diminuída com a instalação de outros usos ou com a revisão de bases de dados de oferta de água.

Analisando os dados apresentados no Atlas de Irrigação (Agência Nacional de Águas, 2021) para municípios que compõem ou estão inse-

ridos em partes no Cerrado (Figura 8), observa-se um potencial efetivo de expansão da área irrigada de 7,3 milhões de hectares, o que equivale a 3,6% da área total do Cerrado (204,5 milhões de hectares).

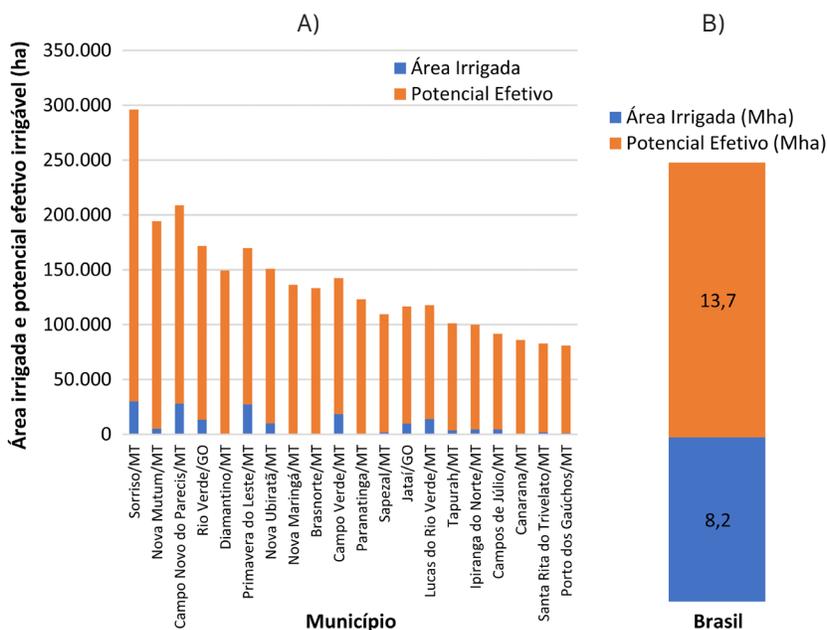


Figura 7. Área irrigada e potencial efetivo de irrigação dos vinte municípios brasileiros com maior potencial (A) e no Brasil (B).

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

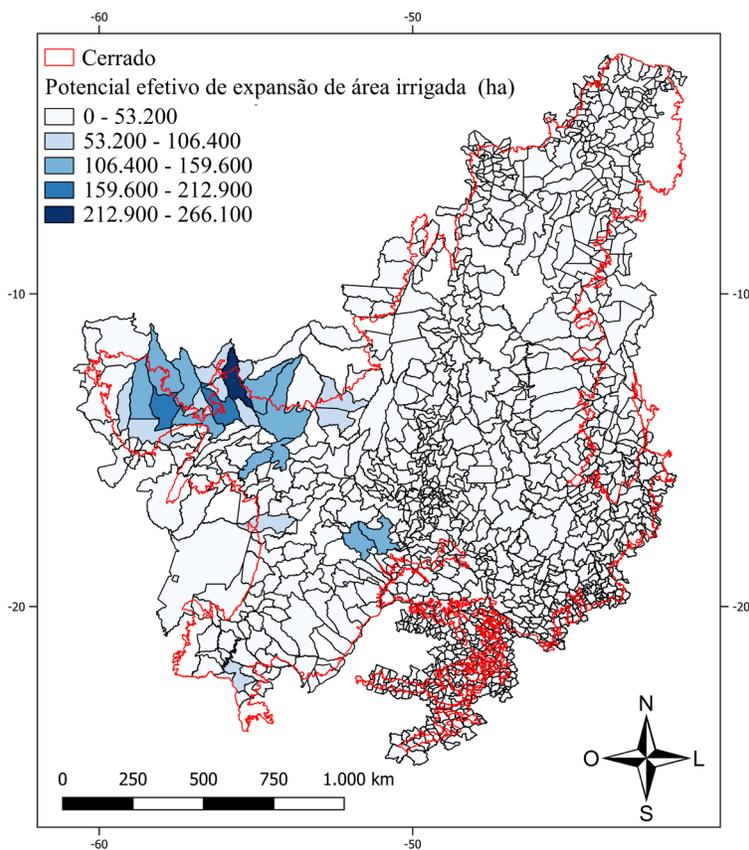


Figura 8. Potencial efetivo de expansão e área irrigada na região do Cerrado.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

Áreas irrigadas por pivô central

A ANA projeta, para 2040, um crescimento de 133% em áreas cultivadas com culturas anuais sob pivô central, o que acarretará um aumento de 7% na demanda hídrica nessas áreas. Por isso, é importante que o país mantenha um programa de monitoramento de expansão de áreas irrigadas nos seus diferentes biomas ou bacias hidrográficas.

Ao contrário de outros sistemas de irrigação, imagens de satélite são excelentes para identificar visualmente as áreas com pivôs centrais por causa da sua forma circular ou semicircular característica. Para isto, basta utilizar a técnica de composição colorida RGB com três bandas espectrais obtidas em diferentes comprimentos de onda das faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e/ou infravermelho médio.

Quando o satélite adquire imagens na banda pancromática (toda a faixa do visível), recomenda-se fusionar as três bandas multiespectrais com a banda pancromática para aumentar a resolução espacial da composição colorida sem perda de informações espectrais. Existem diversas técnicas de fusão de imagens multiespectrais com a banda pancromática, como são os casos da transformação IHS (I = intensidade; H = hue ou matiz; e S = saturação) e transformação Gram-Schmidt, a maioria deles disponíveis em programas de processamento digital de imagens, gratuitas ou comerciais.

O uso de técnicas de classificação supervisionada, não-supervisionada ou orientada a objetos não é recomendado, pois elas não são capazes de produzir polígonos perfeitamente circulares. O tamanho médio das áreas de irrigação por pivô favorece o uso de imagens adquiridas por sensores que operam com resolução espacial moderada, em torno de 10 m a 30 m. Esse é o caso, por exemplo, dos satélites da série Landsat dos Estados Unidos que operam com resolução espacial de 30 m e periodicidade de 16 dias ou 8 dias se os dois satélites atualmente em operação (Landsat 8 e Landsat 9) forem utilizados de forma combinada. Outro exemplo é o Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia (ESA) que opera com resolução espacial de 10 m e periodicidade de 10 dias ou de 5 dias se os dois satélites em operação (Sentinel-2A e Sentinel-2B) forem combinados. Um terceiro exemplo é o satélite sino-brasileiro CBERS-4A que foi lançado em dezembro de 2019 e opera com três câmeras denominadas de multiespectral (MUX), campo

largo (WFI) e multiespectral e pancromática de ampla varredura (WPM). A câmera MUX gera imagens com resolução espacial de 16 m e com revisita a cada 31 dias.

O levantamento da distribuição espacial dos pivôs centrais no bioma Cerrado para o ano de 2020 indicou a existência de um total de 18.820 pivôs no bioma Cerrado (Figura 9), o que corresponde a um aumento de 1.856 pivôs em relação ao levantamento do ano de 2017 (16.964 unidades), ou seja, um aumento médio de 619 unidades por ano no período 2017–2020.

O estado de Minas Gerais, com 7.933 unidades, foi a unidade federativa que apresentou o maior número de pivôs no Cerrado em 2020, seguido de Goiás (4.125 unidades) e São Paulo (3.479). A área total ocupada por pivôs em 2020 no Cerrado foi de 1.253.792 ha, novamente com destaque para os estados de Minas Gerais e Goiás, com 476.094 ha e 283.316 ha, respectivamente. O tamanho médio dos pivôs instalados no Cerrado é de 80 ha. Percebe-se, no entanto, que há uma variação relativamente grande quando essa grandeza é analisada a nível estadual. O tamanho médio dos pivôs instalados em Mato Grosso e Bahia (> 100 ha, em média) são significativamente maiores do que os encontrados em São Paulo e Distrito Federal, ≤ 55 ha, em média).

Na Figura 10, é mostrada a distribuição espacial dos pivôs identificados em 2020. Nota-se a existência de um grande número de pivôs nos estados de Minas Gerais e Goiás, localizados de forma predominantemente dispersa nas porções dos estados cobertas pelo bioma Cerrado. Em outros estados, há uma tendência de os pivôs estarem concentrados em regiões mais específicas como são os casos, por exemplo, do oeste da Bahia (município de Barreiras), oeste do Distrito Federal (Plano de Assentamento Dirigido do Distrito Federal – PAD-DF) e região central do estado de Mato Grosso (ecótono Cerrado/Amazônia, município de Sorriso).

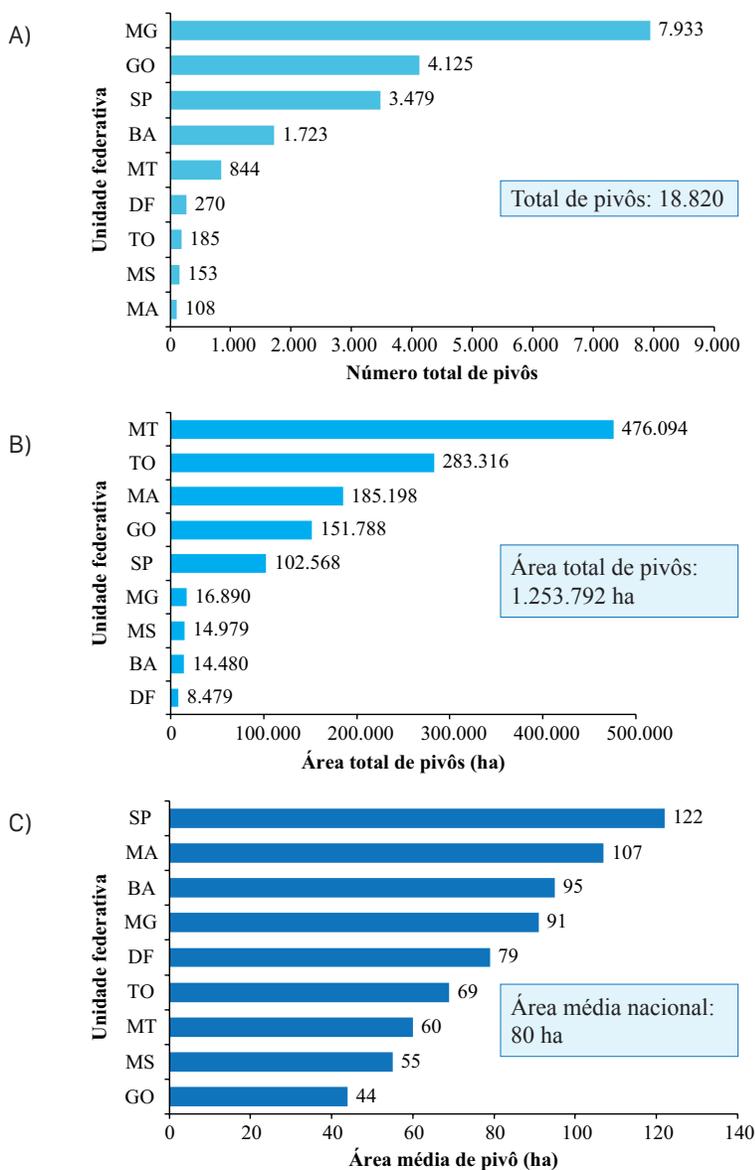


Figura 9. Total, área total e tamanho médio de pivôs centrais localizados no bioma Cerrado em 2020.

Fonte: Elaborado a partir de dados da Agência Nacional de Águas (2021).

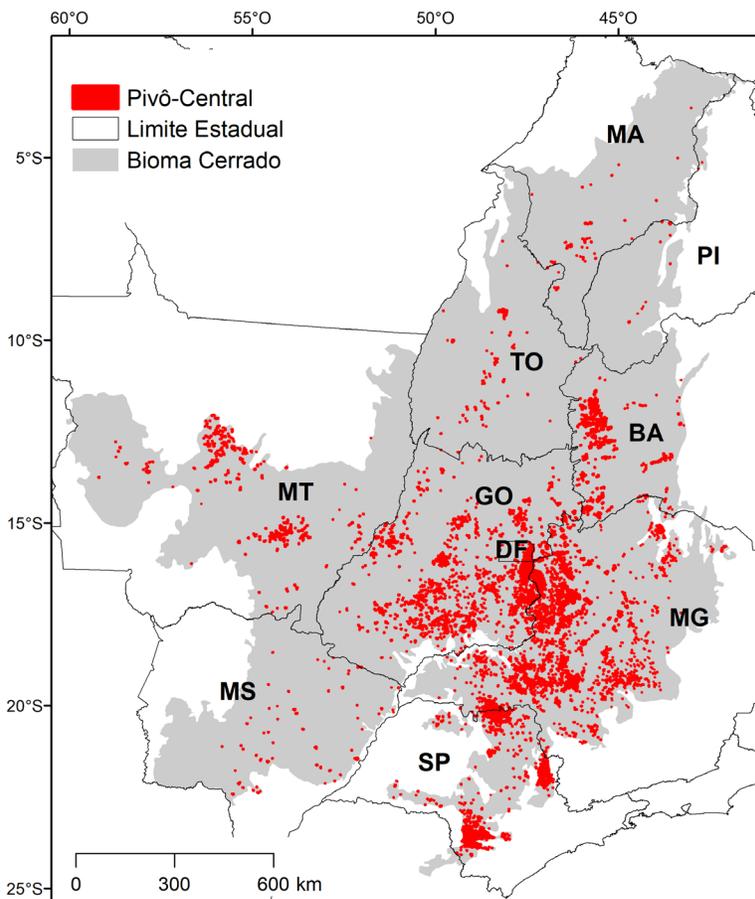
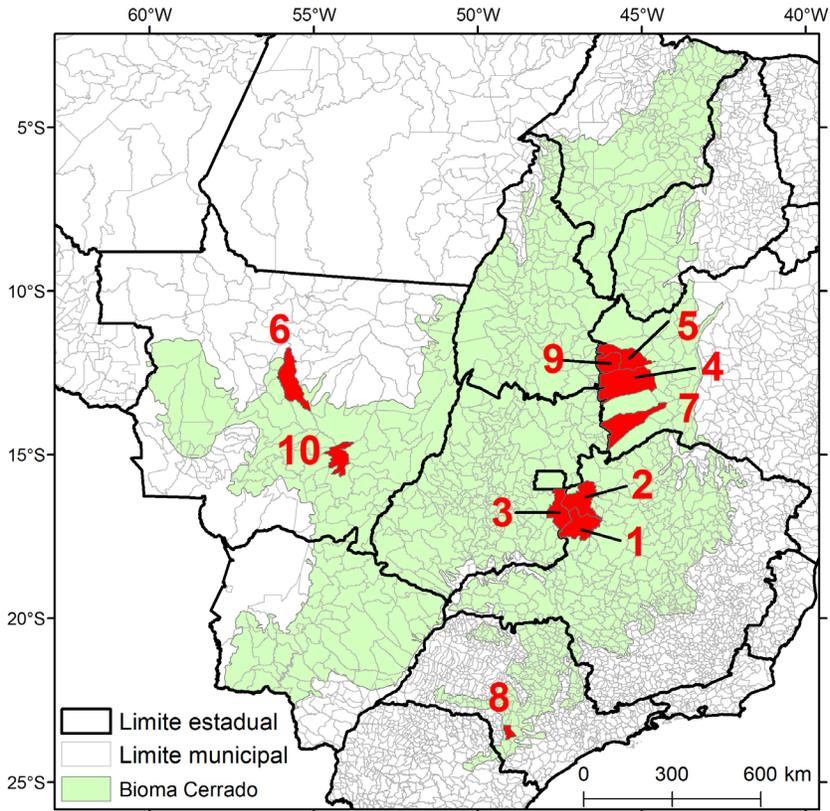


Figura 10. Mapa de distribuição de pivôs centrais no bioma Cerrado para o ano de 2020.

A distribuição espacial dos dez municípios que possuíam as maiores áreas com pivôs em 2020 no bioma Cerrado é mostrada na Figura 11. Esses municípios localizam-se nos estados da Bahia (Barreiras, Jaborandi, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério), Goiás (Cristalina), Mato Grosso (Primavera do Leste e Sorriso), Minas Gerais (Paracatu e Unaí) e São Paulo (Itaí). Paracatu, Unaí e Cristalina também

se destacam por apresentarem números de pivôs significativamente maiores que os demais municípios: 1.178, 890 e 815 unidades, respectivamente. O número de pivôs nos demais municípios é inferior a 400 unidades.



1. Paracatu/MG.....	72.727 ha	6. Primavera do Leste/MT.....	26.666 ha
2. Unai/MG.....	71.572 ha	7. Jaborandi/BA.....	25.128 ha
3. Cristalina/GO.....	62.355 ha	8. Itai/SP.....	19.308 ha
4. São Desidério/BA.....	41.967 ha	9. Luís Eduardo Magalhães/BA.....	19.027 ha
5. Barreiras/BA.....	39.394 ha	10. Sorriso/MT.....	17.985 ha

Figura 11. Localização dos dez municípios do Cerrado com as maiores áreas sob sistema de irrigação por pivô central em 2020, os quais estão concentrados nos estados da Bahia (4 municípios), Goiás (1), Mato Grosso (2), Minas Gerais (2) e São Paulo (1).

A maioria dos estudos baseados em imagens de satélite que envolvem monitoramento de produção agrícola e consumo de água em sistemas de pivôs centrais está relacionado com delimitação visual de áreas ocupadas por esse sistema de irrigação, embora alguns autores tenham proposto com sucesso, algumas técnicas de delimitação automática. Esse é o caso, por exemplo, da abordagem proposta por Tang et al. (2021) que permite delimitação automática e precisa de feições da superfície do terreno baseada na técnica de aprendizagem profunda denominada convolutional neural network (CNN).

Algumas diferenças contrastantes podem ser percebidas quando as áreas com alta concentração de pivôs de diferentes regiões são visualizadas em imagens de satélite. A título de ilustração, na Figura 12, são mostradas partes dos municípios de Barreiras/BA e Itaí/SP com elevada concentração de pivôs. Percebe-se que os pivôs centrais do município baiano são bem mais homogêneos em termos de tamanho e assinatura espectral dos alvos do que os do município paulista. Neste exemplo, na imagem de satélite de Barreiras, predominam os cultivos de café irrigado (cultura perene) enquanto na de Itaí, predominam os cultivos anuais como feijão, soja, milho, trigo e algodão. Dentro deste contexto, as imagens de satélite possuem grande potencial para discriminar diferentes classes de culturas agrícolas, tais como a discriminação entre culturas anuais e perenes ou a discriminação entre grãos e hortaliças. Atualmente, já existem satélites que operam com resolução espacial mais fina e com menor periodicidade que os satélites da série Landsat e cujas imagens podem ser obtidas gratuitamente na internet como é o caso, por exemplo, do satélite Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia (ESA).

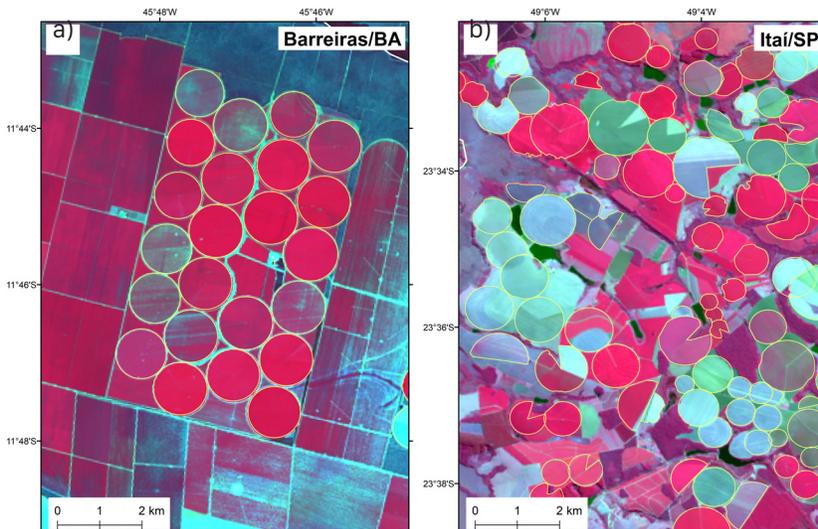


Figura 12. Composição colorida RGB das bandas 4, 5 e 6 do satélite Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) de parte dos municípios de Barreiras/BA (A) e Itaí/SP (B) com elevada concentração de pivôs centrais. Regra geral, no município de Barreiras/BA, os pivôs centrais são nitidamente mais homogêneos em termos de tamanho dos pivôs e assinatura espectral em relação aos do Itaí/SP. Datas das imagens: 01 de janeiro de 2021 (Barreiras/BA) e 01 de agosto de 2020 (Itaí/SP).

Principais culturas irrigadas

Em 2013, a agricultura anual no Cerrado ocupava 17,4 milhões de hectares, representando 9% da área total, enquanto a agricultura perene ocupava 6,4 milhões de hectares, correspondendo 3% da área total. As principais culturas encontradas foram: culturas anuais de sequeiro, como soja, milho e algodão, principalmente plantados em terrenos planos e com solos profundos, ácidos, de baixa fertilidade e elevada concentração de sílica e alumínio; culturas perenes, como café irrigado e citros; e cana-de-açúcar, considerada como cultura semiperene (TerraClass, 2022).

Segundo estudo realizado pela Agrosatélite, no período de 2000 a 2014, a agricultura anual do Cerrado era composta principalmente por soja, algodão e milho. De acordo com este mesmo estudo, a área de soja era concentrada principalmente nos estados de Mato Grosso (35%) e Goiás (22%). Os estados da Bahia e de Mato Grosso representavam 82% da produção total de algodão no Cerrado. A região do Matopiba apresentava 22% da área cultivada de soja na região. A produção de milho em primeira safra nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais representavam 78% da produção total na região.

Os dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019) indicam que as áreas do Cerrado ocupadas com culturas agrícolas anuais, culturas agrícolas perenes, pastagens cultivadas em boas condições e pastagens cultivadas degradadas totalizavam aproximadamente 67,9 milhões de hectares, o que equivale a um aumento de 11,2% quando comparado ao mesmo Censo realizado no ano de 2006 (IBGE, 2009). Essa diferença foi devido ao aumento das áreas de culturas anuais no Cerrado, principalmente nos estados de Tocantins e Piauí, que apresentaram aumento de 132% e 149%, respectivamente. Em todos os estados, exceto Bahia, observou-se uma redução nas áreas de pastagens nativas, que pode ser explicado pela substituição por gramíneas, como o capim braquiária, ou até por outras culturas agrícolas (Sano et al., 2020).

Analisando a produção agrícola de 2019 dos municípios que compõem o Cerrado (IBGE, 2019) (Figura 13), observa-se que a área total plantada com culturas anuais e perenes foi de 42,9 milhões de hectares, o que corresponde a aproximadamente 21% da área total do Cerrado (204,5 milhões de hectares).

Entre as culturas temporárias que têm representação igual ou superior a 0,1% de área plantada, a soja, o milho e a cana-de-açúcar foram as culturas mais cultivadas neste ano de análise, com áreas plantadas de 20,7 milhões, 10,3 milhões e 6,3 milhões de hectares, respectivamente, representando 89,3% da área plantada com culturas

temporárias no Cerrado. Já entre as culturas perenes, as com as maiores áreas plantadas foram laranja (30,8%) e café (46,6%). A soja, milho, cana-de-açúcar, café e laranja foram responsáveis por 38,2 milhões de hectares (89% do total) plantados em 2019, o que corresponde a 18,7% da área do Cerrado.

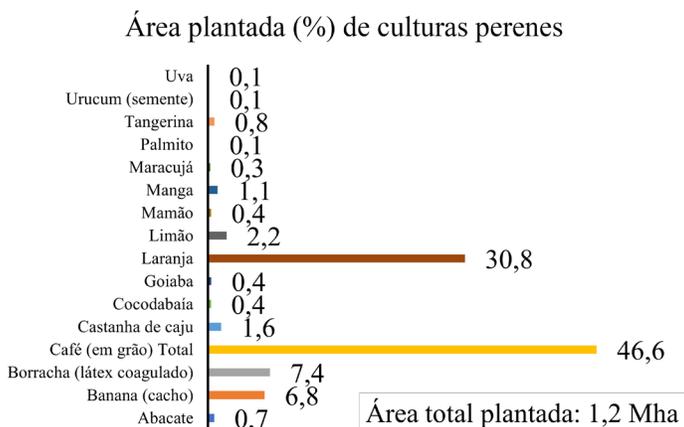
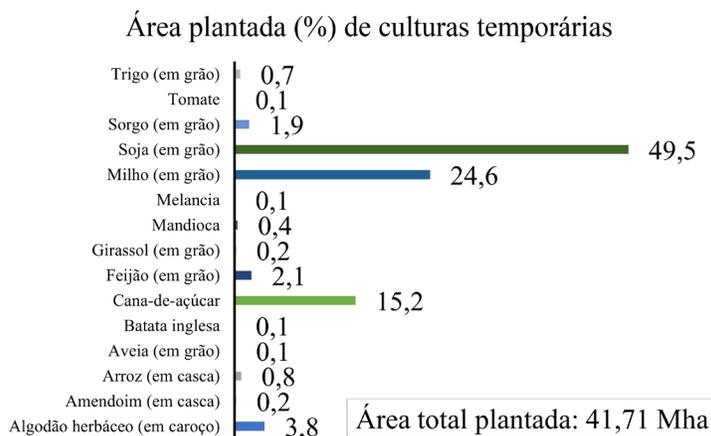


Figura 13. Principais culturas e porcentagem de área plantada ($\geq 0,1\%$) de culturas temporárias e perenes cultivadas em municípios presentes no Cerrado em 2019.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Dados sobre área plantada, área cultivada com irrigação, produção de culturas permanentes (por exemplo, frutas e café), temporárias (por exemplo, soja e milho), horticultura e floricultura são apresentadas na Figura 14. Nas culturas permanentes e na horticultura e floricultura, o gotejamento é o sistema de irrigação mais utilizado, representando, respectivamente, 65% e 75% da área irrigada. Já nas lavouras temporárias, o pivô central se sobressai com um percentual de área irrigada de 75%. De modo geral, a área cultivada com irrigação correspondeu a 73% das lavouras temporárias em 2019.

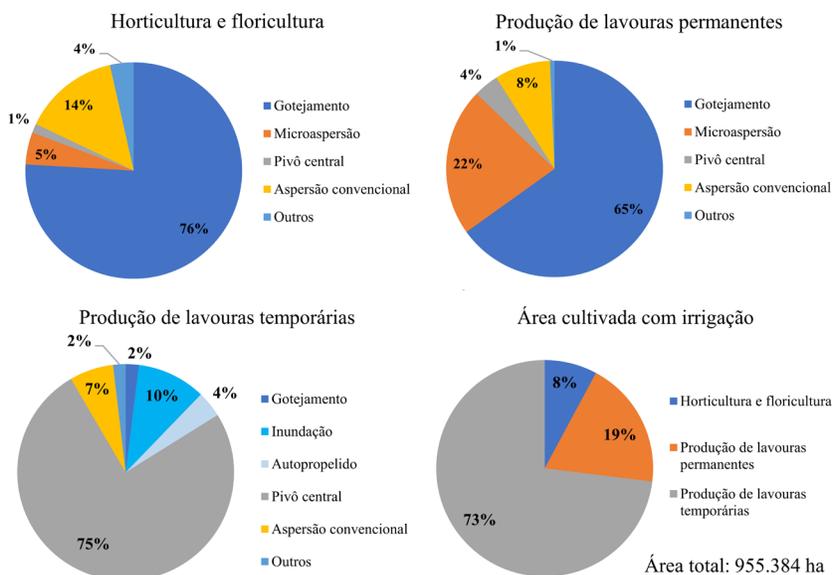


Figura 14. Área ocupada com diferentes sistemas de irrigação em 2019 no Cerrado.

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas irrigação:** uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF, 2021. 130 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. Brazil's corn industry and the effect on the seasonal pattern of US corn exports. **Economic Research Service/USDA**, 2016. 21 p. (USDA. AES-93).

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, v.1, n. 1, p. 56-61, 2019.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília, DF, 2014. 217 p.

EMBRAPA. Grupo de Inteligência territorial estratégica. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. 2014. Disponível em: [https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMato piba.pdf](https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMato%20piba.pdf). Acesso em: 17 out. 2022.

FAO. **Aquastat Fao's Global Information System on Water and Agriculture**. Disponível em: <http://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>. Acesso em: 17 out. 2022.

FAO. **FAOSTAT Statistical Database**. Rome, 2019.

FAO. Food and Agriculture Policy Decision Analysis. **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. Rome, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3759e/i3759e.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

FAO. **The future of food and agriculture: trends and challenges**. Rome, 2017. 180 p.

HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. L.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd edition. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 2007.

IBGE. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro_2006.pdf. Acesso em: 5 ago. 2022.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, 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: 5 ago. 2022.

IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfbr/brasil>. Acesso em: 5 ago. 2022.

KLINK, C. A. Policy intervention in the Cerrado savannas of Brazil: changes in the land use and effects on conservation. CONSORTE-MCCREA, A. G.; FERRAZ SANTOS, E. **Ecology and conservation of the maned wolf**: multidisciplinary perspectives. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 293-308.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; McBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. Denver: USDA, 2016. (USDA. Economic Information Bulletin, 154).

OCDE. **Governança dos recursos hídricos no Brasil**. Paris, 2015. 307 p.

RAMANKUTTY, N.; MEHRABI, Z.; WAHA, K.; JARVIS, L.; KREMEN, C.; HERRERO, M.; RIESEBERG, H. L. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 789-815, 2018.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada**: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017. 327 p.

ROUX, G. **Ancient Iraq**. 3. ed. East Rutherford, NJ: Penguin Books, 1993. 576 p.

SANO, E. E.; BETTIOL, G. M.; MARTINS, E. de S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. de C. Características gerais da paisagem do Cerrado. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Dinâmica agrícola no Cerrado**: análises e projeções. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 1, p. 21-37.

SILVA, A. J.; MONTEIRO, M. S. L.; SILVA, M. V. Contrapontos da consolidação do agronegócio no Cerrado brasileiro. **Sociedade e Território**, v. 27, n. 3, p. 95-114, 2015.

TANG, J.; ARVOR, D.; CORPETTI, T.; TANG, P. Mapping center pivot irrigation systems in the Southern Amazon from Sentinel-2 images. **Water**, v. 13, n. 3, 2021.

TERRACLASS mostra a cobertura e o uso da terra no bioma Cerrado. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/77150778/terraclass-mostra-a-cobertura-e-o-uso-da-terra-no-bioma-cerrado>. Acesso em: 5 ago. 2022.

UNITED NATIONS. **World population prospects**: the 2017 revision, key findings and advance tables. New York, 2017. Disponível em: https://population.un.org/wpp/publications/files/wpp2017_keyfindings.pdf. Acesso em: 5 ago. 2022.

WORLD WATER WEEK LOOKS "BEYOND THE RIVER", 2006. **Proceedings...** Stockholm: IISD, 2006.



Foto: Anderson Ferreira

