

CAPÍTULO 5

O Clima do Cerrado

Daniel Althoff

Lineu Neiva Rodrigues

Edson Eyji Sano

Giovana Maranhão Bettiol



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



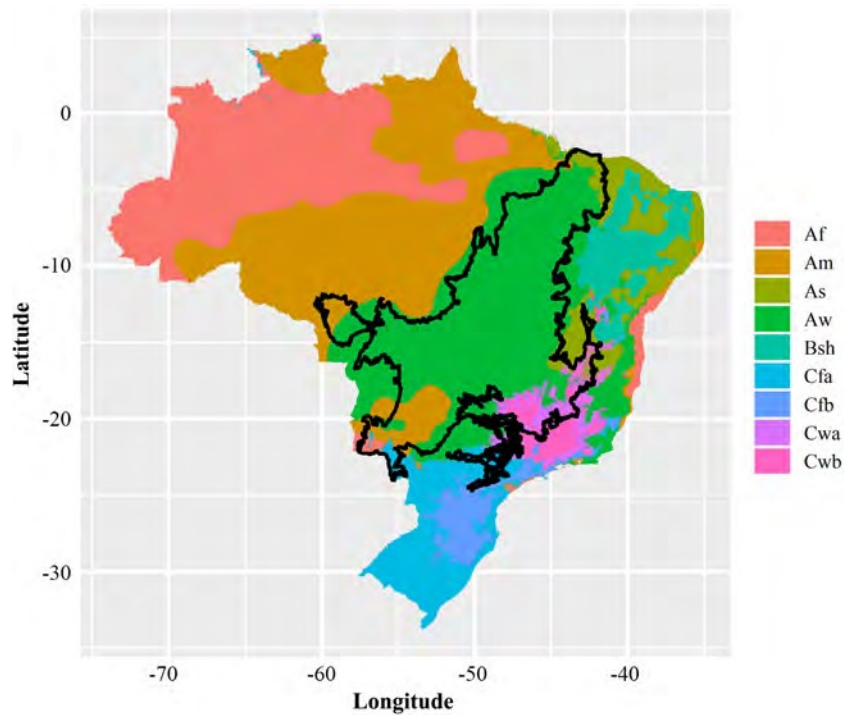
5.1 Introdução

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 5.1). 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 5.1, estão apresentadas 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 5.1. Classificação climática de Köppen.

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

Tabela 5.1. Critérios de temperatura e precipitação para classificação climática de Köppen dos principais climas do Cerrado.

Temperatura ⁽¹⁾			Precipitação ⁽²⁾			Clima	
Tcold	Thot	Tann	Pm	Pann	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).
⁽²⁾Pm = 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).

5.2 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 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 disso, 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 provenientes 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 25×25 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 estimar 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 5.2). 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 5.3). Por outro lado, os estados 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 a 1,5 mil milímetro por ano.

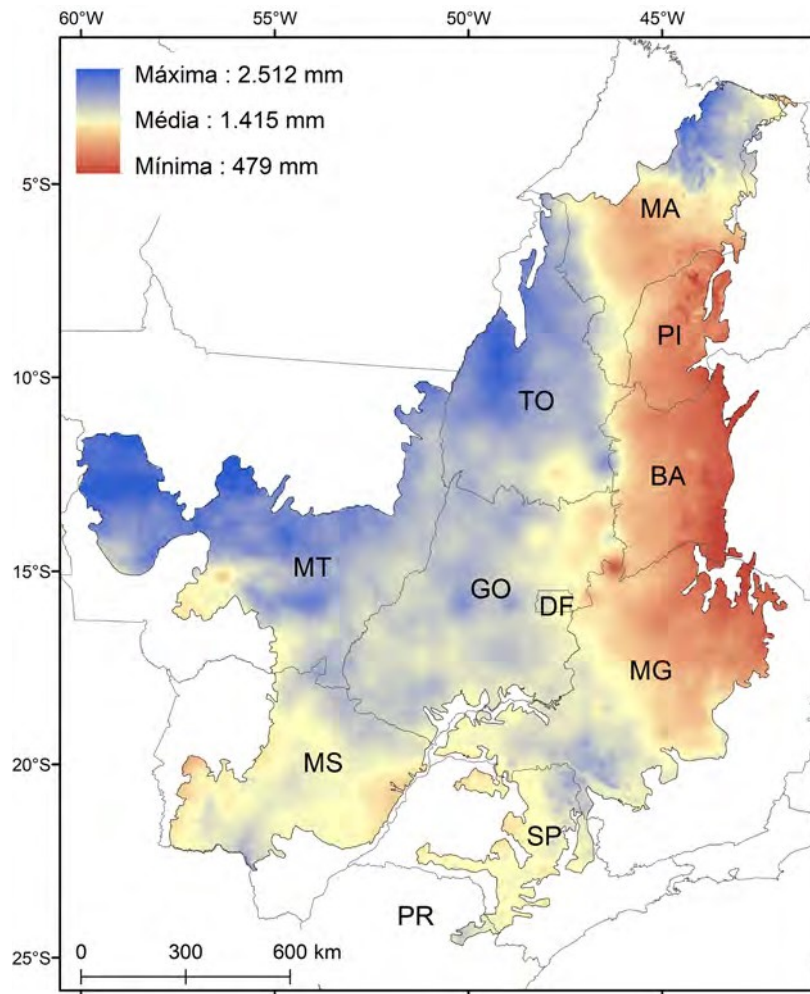


Figura 5.2. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado (período: 1981–2021).

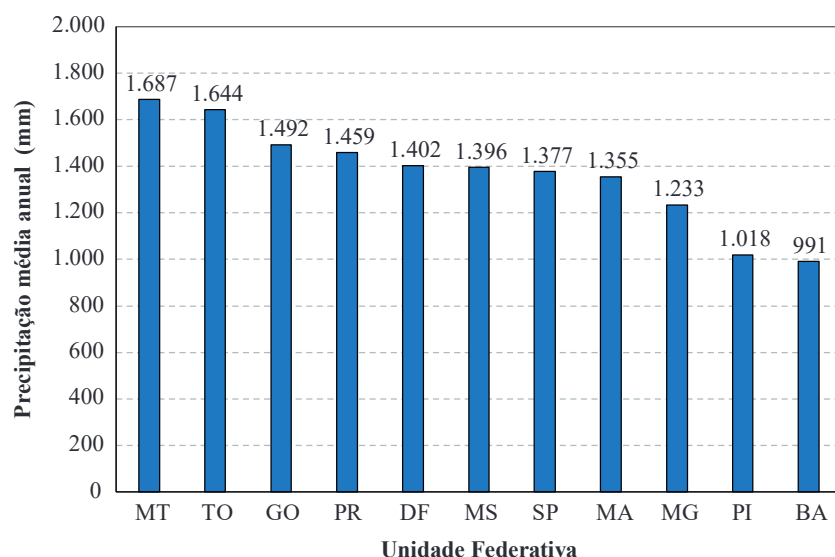


Figura 5.3. Precipitação média anual de chuvas no bioma Cerrado, discriminada por unidade federativa (período: 1981–2021).

Na Figura 5.4, 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 aquecimento 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.

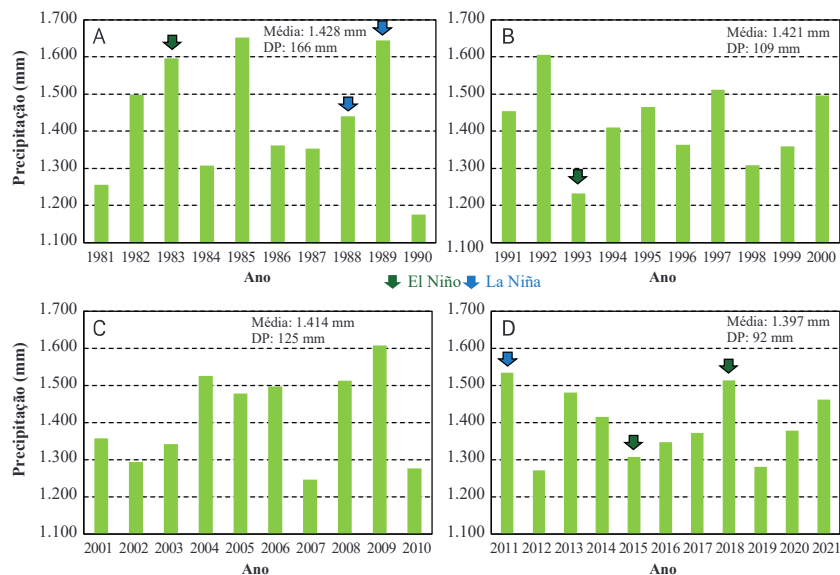


Figura 5.4. Distribuição anual de chuva no Cerrado nas décadas de 1981–1990 (A), 1991–2000 (B), 2001–2010 (C) e 2011–2021 (D).

Na Figura 5.5, 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 5.5, 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.

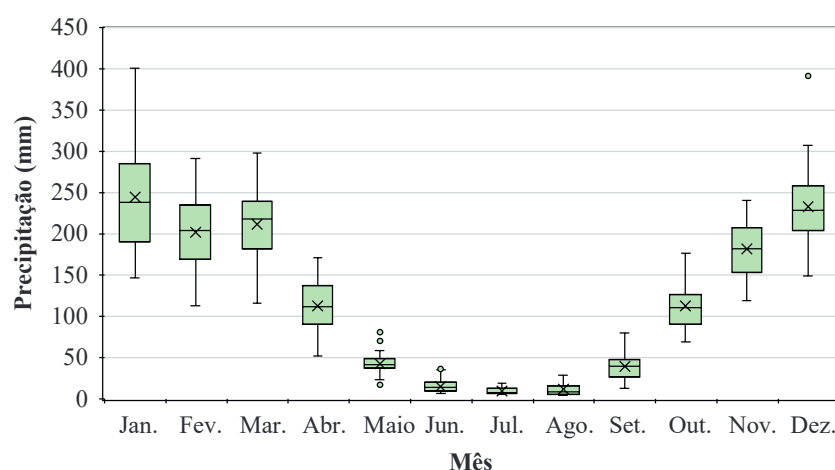


Figura 5.5. Boxplot de precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

Na Figura 5.6, 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 a 825 mm; do milho, de 450 a 750 mm; do algodão, de 550 a 950 mm; e do feijão, 250 a 500 mm (Doorenbos; Pruitt, 1977a).

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 5.7). 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).

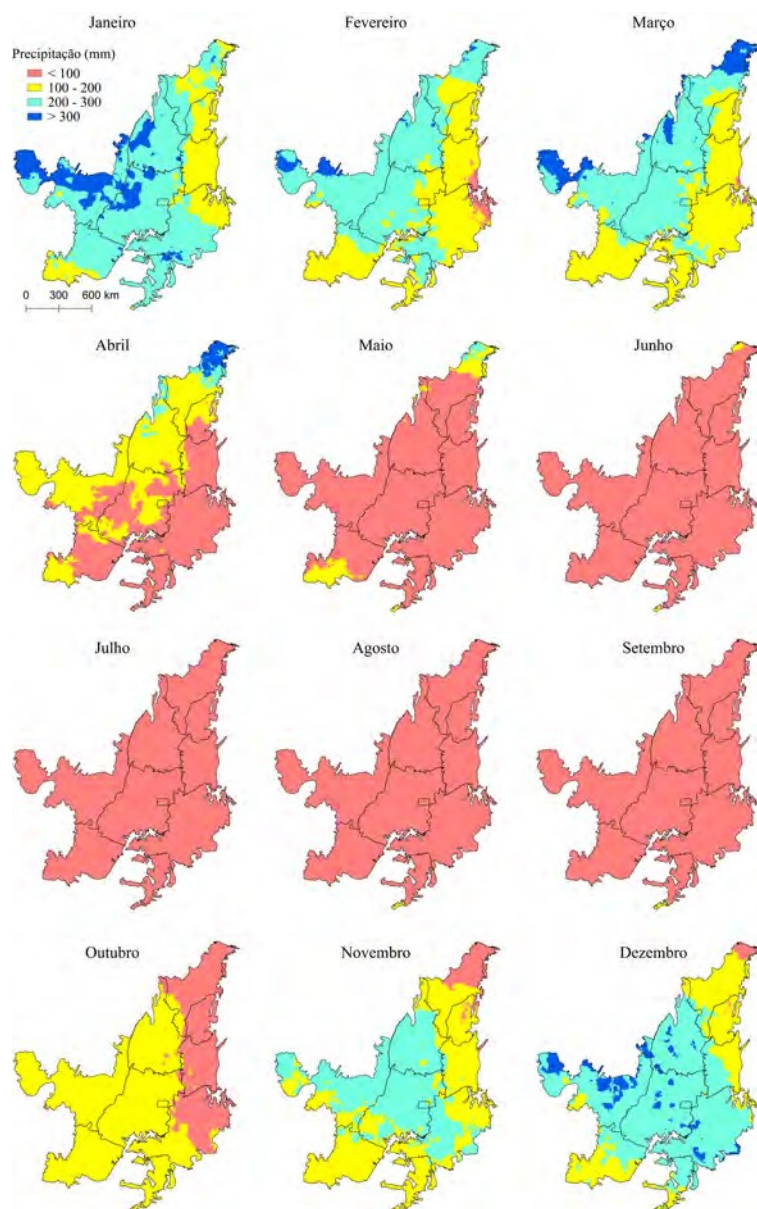


Figura 5.6. Distribuição espacial da precipitação média mensal no bioma Cerrado no período 1981–2021.

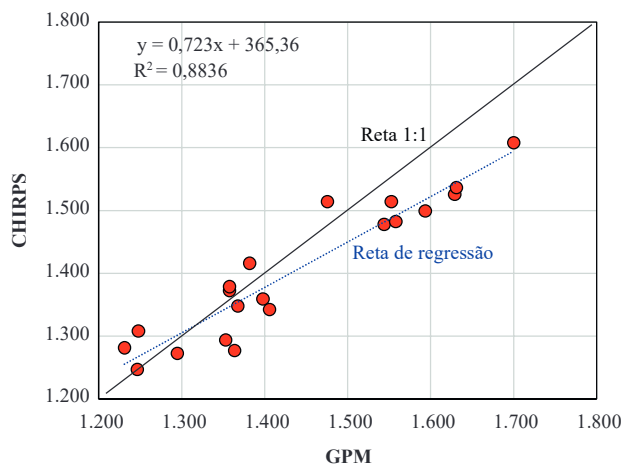


Figura 5.7. Comparação entre os dados de precipitação total anual (mm) produzidos pelo GPM e CHIRPS para o bioma Cerrado no período 2001–2020.

Na Figura 5.8A, são apresentados, com base nos dados do GPM, seis locais distintos do Cerrado e suas respectivas precipitações médias mensais. Na Figura 5.8B, 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).

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 por mês em 60% do tempo

e maior ou igual a 131 mm por mês em 20% do tempo. Já a região 4, para o mesmo período, apresenta precipitação maior ou igual a 7 mm por mês em 60% do tempo e maior ou igual a 22 mm por mês 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 5.8B).

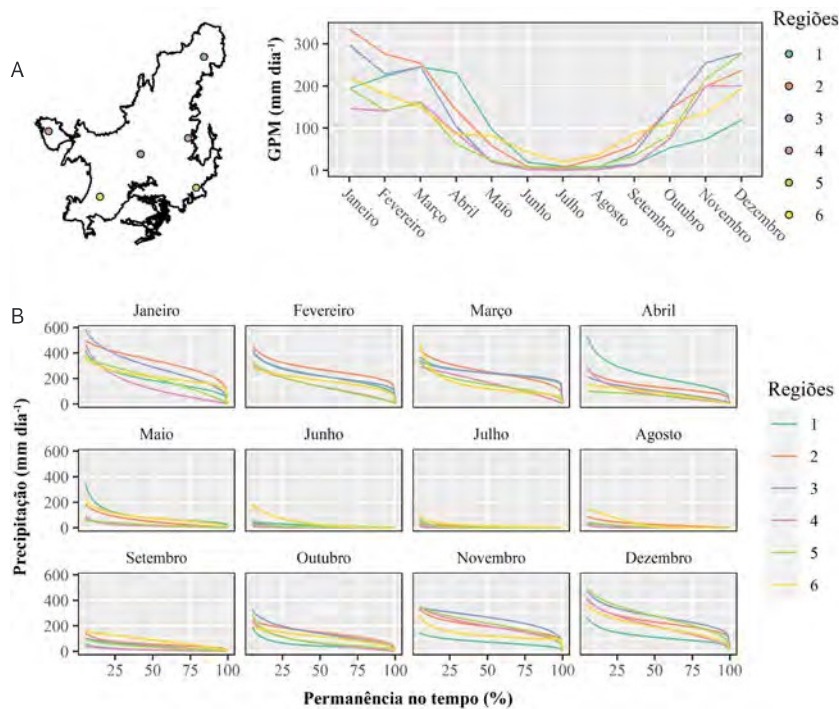


Figura 5.8. Médias mensais de precipitação e curvas de permanência (função distribuição acumulada) associadas à série histórica mensal de precipitação para seis regiões distintas no Cerrado. Médias mensais (A); e curvas de permanência (B).

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 pre-

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 5.9), 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.

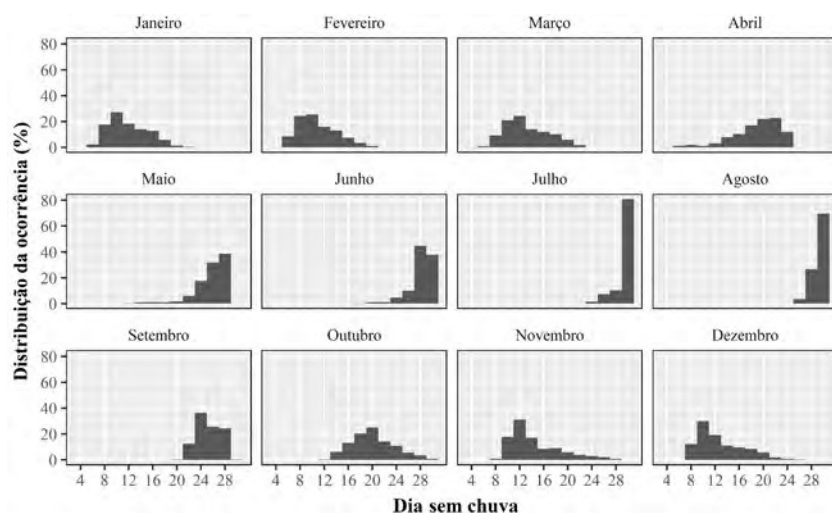


Figura 5.9. Distribuição da ocorrência de média de dias sem chuva mensalmente para todo o Cerrado.

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 5.10). 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.

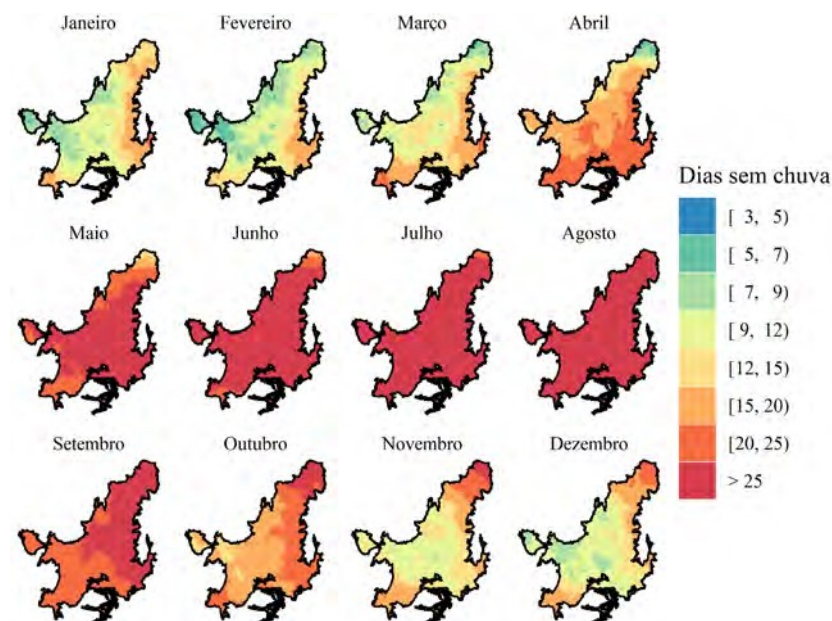


Figura 5.10. Número médio de dias sem chuva em cada mês do ano para o Cerrado.

5.3 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 (ET_c). A ET_c 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 (Xavier et al., 2016; Abatzoglou et al., 2018; Althoff et al., 2020b), que podem ser utilizadas para essa finalidade.

O ET_o-Brazil (Althoff et al., 2020b) é uma das bases de dados de ET_o disponível para todo o território brasileiro. Essa base de dados foi derivada de dados ET_o 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 ET_o, independentemente da existência de estações meteorológicas, para qualquer região do Brasil e com resolução temporal em base diária e espacial de 0,10° x 0,10° (aproximadamente 10 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 5.11, 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 a 6,7 mm por dia, com mais de 50% do Cerrado apresentando valores entre 4,6 e 5,1 mm por dia. 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.

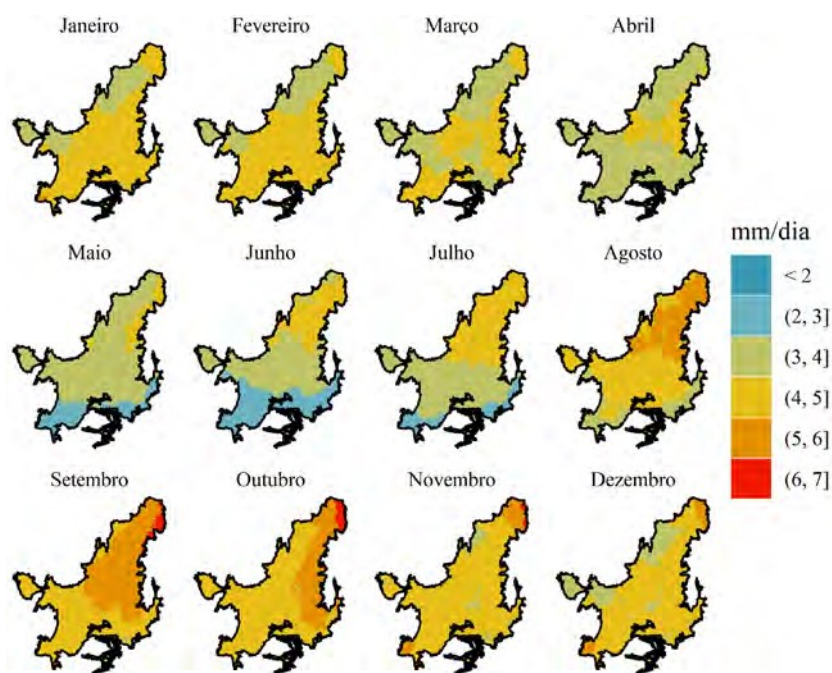


Figura 5.11. Evapotranspiração de referência média mensal para o Cerrado. Período de referência: junho de 2000 a dezembro de 2019 produto.

Em termos de volume de água demandado, o Oeste Baiano, por exemplo, apresenta uma demanda média de ETo entre 5 e 6 mm por dia, no mês de outubro, o que representaria um total de 5 mil 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 ETo ficaria entre 2 a 3 mm por dia e, portanto, 2 mil a 3 mil metros cúbicos por dia para os mesmos cem ha.

Na Figura 5.12A, apresenta-se a ETo média mensal, como exemplo, para seis regiões distintas, enquanto, na Figura 5.12B 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.

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 ~3,6 mm por dia, em 60% do tempo, e maior ou igual a ~4,4 mm por dia, em 20% do tempo. Já a região 5, para o mesmo período, apresenta ETo maior ou igual a ~4,0 mm por dia, em 60% do tempo, e maior ou igual a 5,8 mm por dia, 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 5.12B). 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.

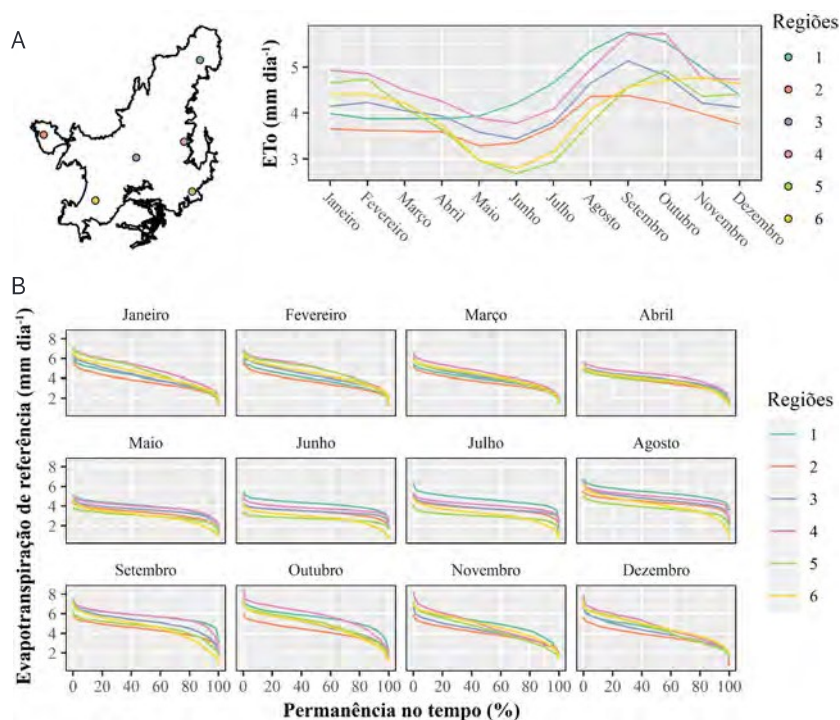


Figura 5.12. Médias mensais de evapotranspiração de referência (ETo) (A); e curvas de permanência associadas à série histórica diária de ETo para seis regiões distintas no Cerrado (B).

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 5.13, 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 outubro 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.

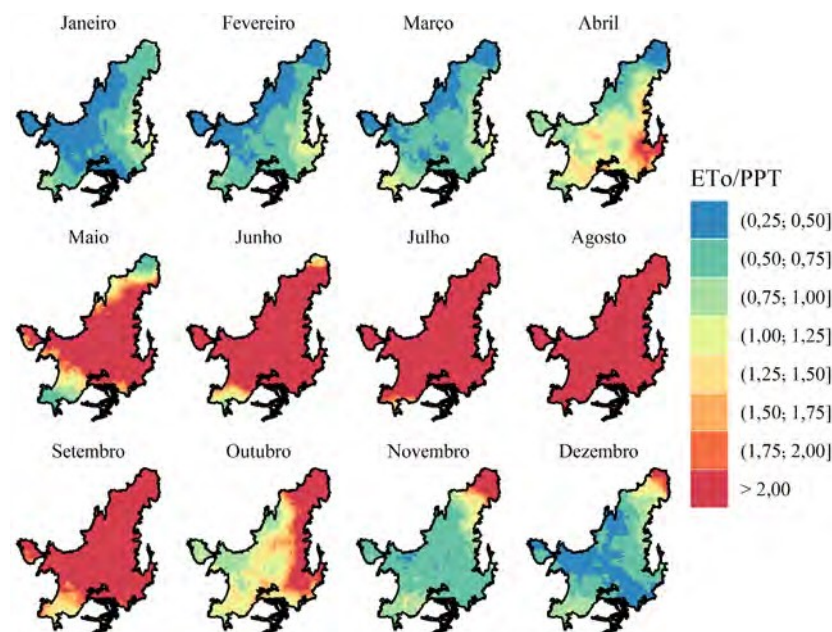


Figura 5.13. Índice de aridez mensal para o Cerrado baseado nos dados de evapotranspiração de referência do ETo-Brazil e estimativas de precipitação de satélite do IMERG.

Na Figura 5.14, 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 geral, 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.

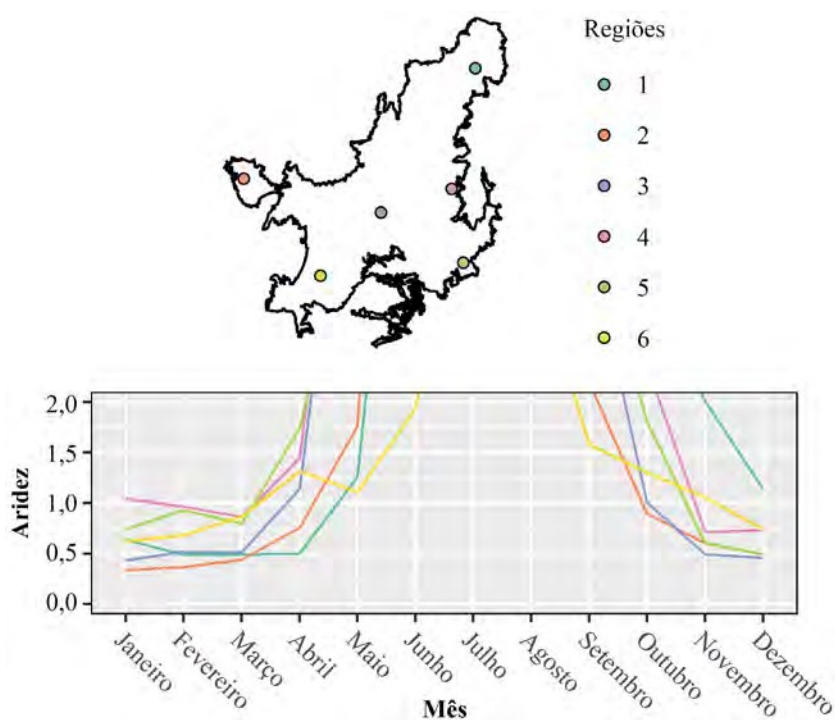


Figura 5.14. Índice de aridez mensal para seis regiões distintas do Cerrado.

5.4 Considerações finais

Este capítulo apresenta uma análise da precipitação e da evapotranspiração de referência no Cerrado. Essas duas variáveis são fundamentais para o planejamento e manejo da irrigação.

A precipitação média anual no Cerrado é de 1.415 mm. A precipitação mínima anual é de 479 mm, concentrada principalmente na região de transição com o bioma Caatinga, enquanto a precipitação máxima anual é de 2.512 mm, encontrada principalmente na região de transição com o bioma Amazônia. A evapotranspiração de referência total média anual do Cerrado varia entre 1.080 mm, na região de transição entre Cerrado e Mata Atlântica e 1.905 mm no Piauí. Os maiores valores de evapotranspiração de referência ocorrem entre agosto e novembro, no leste e no norte do Cerrado.

A agricultura irrigada no Brasil, assim como em outros países, sempre terá grandes desafios a serem enfrentados. Grande parte desses desafios tem relação com o clima, em especial com a precipitação e com a evapotranspiração. Informações sintetizadas sobre essas variáveis, que indique a sua variabilidade no tempo e no espaço, são fundamentais para os tomadores de decisão e formuladores de política pública.

Os avanços necessários para manejar o aumento da escassez hídrica e outros problemas emergentes na região dependerão fortemente da constituição de bases de conhecimento, de novas tecnologias, de estratégias de manejo e certamente de políticas públicas que tragam segurança para o irrigante.

5.5 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. 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.

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.

SANO, E.E.; FERREIRA, L.G.; ASNER, G.P.; STEINKE, E.T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2739-2752, 2007.

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.