



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

JÚLIA MENEZES DOS SANTOS

**VARIABILIDADE DA UMIDADE DO SOLO NOS BIOMAS BRASILEIROS A
PARTIR DO USO DE DADOS DE SATÉLITES E REANÁLISE: UMA ANÁLISE
COM A PRECIPITAÇÃO**

João Pessoa

2025

JÚLIA MENEZES DOS SANTOS

**VARIABILIDADE DA UMIDADE DO SOLO NOS BIOMAS BRASILEIROS A
PARTIR DO USO DE DADOS DE SATÉLITES E REANÁLISE: UMA ANÁLISE
COM A PRECIPITAÇÃO**

Monografia apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho.

João Pessoa

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237v Santos, Julia Menezes Dos.

VARIABILIDADE DA UMIDADE DO SOLO NOS BIOMAS
BRASILEIROS A PARTIR DO USO DE DADOS DE SATÉLITES E
REANÁLISE: UMA ANÁLISE COM A PRECIPITAÇÃO / Julia
Menezes Dos Santos. - João Pessoa, 2025.

82 f.

Orientação: Victor Hugo Rabelo Coelho Coelho.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Precipitação. 2. Umidade do solo. 3. Era5-Land.
4. IMERG V07. 5. Biomas. I. Coelho, Victor Hugo Rabelo
Coelho. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

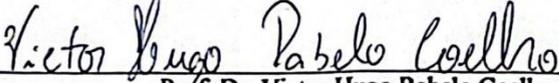
CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JÚLIA MENEZES DOS SANTOS

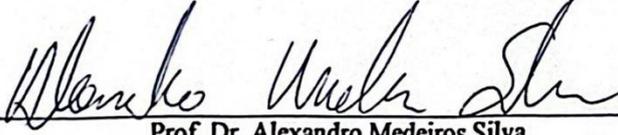
**VARIABILIDADE DA UMIDADE DO SOLO NOS BIOMAS BRASILEIROS A PARTIR
DO USO DE DADOS DE SATÉLITES E REANÁLISE: UMA ANÁLISE COM A
PRECIPITAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 28/04/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:



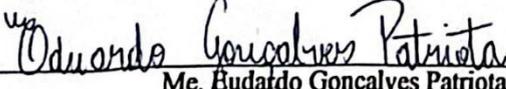
Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)



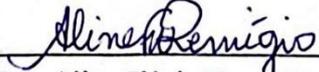
Prof. Dr. Alexandre Medeiros Silva
UFPB

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)



Me. Oduardo Gonçalves Patriota

APROVADO
(Aprovado/Reprovado)



Profa. Dra. Aline Flávia Nunes Remíngio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Este trabalho de conclusão de curso é Dedicado à Sagrada Família, aos meus pais (Eládio Vitorino dos Santos Júnior e Ilka Fabiana de Oliveira Menezes), e ao meu namorado (Douglas Berto Vasconcelos Soares), por todo apoio durante minha viência acadêmica. Dedico aos meus professores, por fazerem parte da minha trajetória e compartilharem seu conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Eládio Vitorino dos Santos Júnior e Ilka Fabiana de Oliveira Menezes, minha eterna gratidão por cada sonho abdicado para que os meus pudessem se realizar. Obrigada pelos ensinamentos, pelo apoio incondicional e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que eu duvidei de mim mesma. Mamãe, sou grata por me alfabetizar aos três anos e por sempre desejar o meu melhor em todos os aspectos da minha vida. Papai, obrigada por ser meu exemplo de força, dedicação e estudo, por inspirar minha trajetória na pesquisa e por apoiar todas as minhas decisões acadêmicas.

Ao amor da minha vida, que a própria universidade me presenteou, meu companheiro de jornada que esteve ao meu lado em cada desafio acadêmico desde o início. Obrigada por compartilhar comigo cada conquista, trabalho, pesquisa e disciplina, tornando essa caminhada mais leve e significativa.

Às minhas amigas de curso e de vida, Izabely Ester, Larissa Amaral e Kaliane Santos, por dividirem comigo os dias intensos, as dificuldades, as comemorações, os prazos apertados, as risadas e as frustrações. Vocês tornaram minha vida acadêmica mais feliz e especial.

Ao meu primeiro orientador de PIVIC, Dr. Alexandre Medeiros, por me proporcionar a primeira oportunidade de conhecer a geografia e suas múltiplas possibilidades dentro do Sensoriamento Remoto. Ao meu orientador de PIBIC e TCC, Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho, pela confiança depositada em minha capacidade, pela orientação cuidadosa e pelo incentivo ao longo dessa trajetória. E ao grupo de pesquisa, principalmente ao meu amigo Welton, e todos os ICs, que assim como eu, abraçaram a vertente acadêmica e se dedicaram a mesma.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

O armazenamento de água no solo é fundamental para entender a dinâmica hídrica e a sustentabilidade dos recursos hídricos. Enquanto dados de monitoramento *in situ* são limitados, o sensoriamento remoto tem se mostrado essencial, com satélites como SMOS e SMAP fornecendo informações globais sobre a umidade do solo, contribuindo para o entendimento do comportamento dos ecossistemas, especialmente em macroescala. Produtos como o ERA5-Land vêm apresentando avanços significativos na análise da umidade em relação à precipitação e evapotranspiração. O presente trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade do índice de umidade do solo em paralelo aos dados de precipitação do produto IMERG V07, considerando os biomas brasileiros: Pampa, Pantanal, Caatinga, Cerrado, Amazônia e Mata Atlântica, no período de 2000 a 2024. Os dados foram extraídos das plataformas ERA5-Land e IMERG V07, ambos disponibilizados no Google Earth Engine (GEE). A análise revelou comportamentos distintos entre os biomas brasileiros ao longo da série temporal de 2000 a 2024. Na Amazônia e na Mata Atlântica, os elevados índices de precipitação mantiveram altos níveis de umidade do solo em todas as profundidades, com estabilidade ao longo dos anos. O Pantanal apresentou redução da umidade nas camadas mais profundas a partir de 2020, associada ao aumento de queimadas. No Cerrado, observou-se queda na umidade superficial e estabilidade em profundidade, refletindo a forte sazonalidade e os impactos da estiagem. A Caatinga evidenciou baixos índices de umidade e tendência decrescente nas séries, com alta sensibilidade a eventos de seca. O Pampa, por sua vez, mostrou estabilidade hídrica, com baixos valores na superfície e maiores em profundidade, atribuídos à textura argilosa dos solos. A correlação entre a umidade e as variáveis climáticas é vital para o aprimoramento de modelos de previsão e para a identificação de áreas suscetíveis à desertificação e perda de biodiversidade. Ressalta-se, ainda, a importância da validação dessas estimativas, tanto para a precipitação quanto para a umidade do solo, a fim de fortalecer a confiabilidade das análises em escalas regionais e nacionais.

Palavras-chave: Precipitação; Umidade do solo; Era5-Land; IMERG V07; Biomas.

ABSTRACT

Soil water storage is essential for understanding hydrological dynamics and the sustainability of water resources. While in situ monitoring data are limited, remote sensing has proven to be crucial, with satellites such as SMOS and SMAP providing global information on soil moisture, contributing to the understanding of ecosystem behavior, especially at the macroscale. Products like ERA5-Land have shown significant advances in the analysis of moisture in relation to precipitation and evapotranspiration. The aim of this study was to analyze the variability of the soil moisture index in parallel with precipitation data from the IMERG V07 product, considering the Brazilian biomes: Pampa, Pantanal, Caatinga, Cerrado, Amazon, and Atlantic Forest, over the period from 2000 to 2024. Data were extracted from the ERA5-Land and IMERG V07 platforms, both made available through Google Earth Engine (GEE). The analysis revealed distinct patterns among the biomes over the 2000–2024 time series. In the Amazon and Atlantic Forest, high precipitation rates maintained elevated soil moisture levels at all depths, with stability over the years. The Pantanal showed a reduction in moisture in deeper layers from 2020 onwards, associated with an increase in wildfires. In the Cerrado, a decline in surface moisture and stability at depth was observed, reflecting strong seasonality and the impacts of drought. The Caatinga exhibited low moisture levels and a decreasing trend in the series, with high sensitivity to drought events. The Pampa, in turn, showed hydrological stability, with low surface values and higher levels at depth, attributed to the clayey texture of the soils. The correlation between moisture and climatic variables is vital for improving forecasting models and identifying areas susceptible to desertification and biodiversity loss. Furthermore, it is important to emphasize the need for validation of these estimates, both for precipitation and soil moisture, in order to strengthen the reliability of analyses at regional and national scales.

Keywords: Precipitation; Soil moisture; ERA5-Land; IMERG V07; Biomes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do Ciclo Hidrológico _____	16
Figura 2: Esquematização do volume de controle _____	17
Figura 3: Evolução do perfil do solo _____	23
Figura 4: Representação dos fatores de formação do solo _____	27
Figura 5: Representação dos horizontes do solo _____	31
Figura 6: Fases constituintes do solo (a) e Classificação da água no solo (b) _____	33
Figura 7: Ilustração da obtenção de dados e imagens por sensoriamento remoto _____	35
Figura 8: Mapa da área de estudo _____	48
Figura 9: Fluxograma do código para obtenção dos dados de Precipitação _____	54
Figura 10: Fluxograma do código para obtenção dos dados de Umidade do Solo _____	56
Figura 11: Mapa da série histórica de precipitação (e) e umidade do solo por profundidade (a), (b), (c) e (d) _____	59
Figura 12: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Pantanal _____	67
Figura 13: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Cerrado _____	67
Figura 14: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Pampa _____	68
Figura 15: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Amazônia _____	68
Figura 16: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Caatinga _____	69
Figura 17: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Mata Atlântica _____	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe das profundidades dos solos_____	32
Tabela 2: Produtos de umidade do solo disponibilizados no GEE_____	46
Tabela 3: Divisão das bandas de acordo com a profundidade. _____	55
Tabela 4: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 0 a 7 cm_____	70
Tabela 5: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 7 a 28 cm_____	71
Tabela 6: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 28 a 100 cm. ____	72
Tabela 7: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 100 a 289 cm_____	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Ciclo Hidrológico	16
3.2	Precipitação.....	17
3.2.1	Regimes de Precipitação no Brasil	20
3.3	Infiltração e armazenamento de água no solo.....	22
3.3.1	Capacidade de infiltração	24
3.3.2	Fatores que influenciam na capacidade de infiltração.....	25
3.4	Solo	27
3.4.1	Formação do Solo.....	27
3.4.2	Caracterização do Solo	30
3.5	Umidade do Solo	32
3.6	Sensoriamento Remoto	34
3.6.1	Produto derivado do sensoriamento remoto para análise de precipitação.....	36
3.6.2	Produto derivado do sensoriamento remoto para análise de umidade do solo...	38
4	METODOLOGIA	47
4.1	Área de estudo	47
4.2	Obtenção dos dados	52
1	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

O armazenamento de água no solo é um parâmetro essencial para a avaliação da sustentabilidade e da dinâmica dos recursos hídricos, uma vez que suas variações refletem diretamente o equilíbrio entre os fluxos de entrada e saída no balanço hídrico. Esse comportamento é influenciado tanto por fatores naturais — como clima, tipo de solo e cobertura vegetal — quanto por intervenções antrópicas, como práticas de irrigação e mudanças no uso e ocupação do solo.

A umidade do solo pode ser determinada *in situ* por meio de métodos diretos, como o método gravimétrico, considerado padrão por sua precisão, embora seja de aplicação limitada devido à sua natureza destrutiva e demanda de tempo (Teixeira et al., 2017). Métodos indiretos, como sensores de TDR (Time Domain Reflectometry) e FDR (Frequency Domain Reflectometry), têm se tornado mais comuns por permitirem medições contínuas e automatizadas, sendo úteis em estudos de monitoramento ambiental e agrícola (Souza et al., 2021).

No Brasil, instituições como a EMBRAPA e a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), operada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), são importantes fontes de dados sobre umidade do solo, fornecendo tanto medições em campo quanto informações técnicas por meio de plataformas digitais e boletins hidrometeorológicos.

No entanto, a escassez de dados de monitoramento *in situ* e a limitada capacidade de modelagem regional ainda representam desafios significativos para uma compreensão mais abrangente desse processo.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta indispensável para a obtenção de informações sobre o armazenamento de água no solo. Missões como a *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) e a *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) têm contribuído significativamente para o monitoramento global da umidade do solo, ampliando o entendimento sobre as variações espaciais e temporais desse parâmetro (Tangdamrongsub et al., 2021).

Entre os produtos utilizados, destaca-se o ERA5-Land, cuja análise integrada com séries históricas de precipitação, evapotranspiração potencial (ETP) e o Índice de Vegetação por

Diferença Normalizada (NDVI), tem mostrado potencial para investigar e modelar cenários associados às mudanças climáticas (Lal, P. et al., 2023).

Em um estudo recente realizado em 2023, por Lal P. et al, observou-se que 48,3% das áreas vegetadas do planeta experimentaram condições de seca ao longo de 40 anos, com tendência significativa de redução da umidade do solo superficial (0 a 7 cm). Por outro lado, cerca de 9% dessas áreas apresentaram aumento da umidade nesse mesmo intervalo. Esses padrões divergentes evidenciam a complexidade das respostas ecossistêmicas frente às alterações climáticas, que são moduladas por fatores como precipitação, temperatura e uso da terra (Lal, P. et al., 2023).

Nos últimos anos, os avanços no sensoriamento remoto têm contribuído significativamente para o monitoramento da precipitação em escala global. Um exemplo relevante é o produto IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*), desenvolvido no âmbito do programa *Global Precipitation Measurement* (GPM), que oferece estimativas de chuva com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, e temporal de 30 min, a partir da integração de diversos satélites (Rozante e Rozante, 2024; NASA, 2023).

A versão mais recente, IMERG V07, incorporou melhorias importantes na qualidade dos dados e passou a integrar medições de pluviômetros na sua versão Final Run, aumentando sua confiabilidade em estudos ambientais e climáticos, sobretudo em regiões com carência de observações de solo (Nepal, 2021; HSU, 2021).

Para o território brasileiro, esse produto tem se mostrado especialmente útil na representação de eventos associados aos principais sistemas meteorológicos da América do Sul, mesmo apresentando limitações em determinadas condições atmosféricas, como nas áreas com predomínio de nuvens de topo quente (Rozante e Rozante, 2024).

Portanto, a umidade do solo e a precipitação configuram variáveis-chave na compreensão dos processos hidrológicos e ecológicos em diferentes escalas espaciais e temporais. A integração de dados de umidade do solo obtidos por sensoriamento remoto, combinados a registros de precipitação, oferece uma base consistente para analisar a dinâmica hídrica nos ecossistemas e suas respostas às condições climáticas (Lal, P. et al., 2023).

Ainda assim, a heterogeneidade espacial e temporal dos dados, aliada à complexidade dos processos que envolvem essas variáveis, impõe desafios à análise integrada. Nesse sentido, este

estudo busca contribuir com a caracterização da variabilidade da umidade do solo no Brasil, considerando as especificidades dos diferentes ambientes e utilizando os dados disponibilizados pelos produtos ERA5-Land e IMERG V07, com ênfase nos principais biomas brasileiros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a variabilidade temporal da umidade do solo nos biomas brasileiros entre 2000 e 2024, e investigar sua relação com os padrões de precipitação (IMERG V07), a fim de compreender influências climáticas sobre o comportamento hídrico do solo em diferentes biomas do país.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar os principais produtos de umidade do solo disponíveis na plataforma Google Earth Engine (GEE), categorizando-os de acordo com a fonte de origem (sensoriamento remoto ou reanálise);
- Avaliar o produto ERA5-Land para avaliar a variabilidade da umidade do solo ao longo de 21 anos (2000 a 2024) nos biomas brasileiros;
- Realizar a análise conjunta dos dados de umidade e precipitação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Ciclo Hidrológico

O funcionamento dos nossos ecossistemas como um todo depende do ciclo hidrológico (Figura 1), este, composto pela relação das atividades atmosféricas com a superfície terrestre. O ciclo se inicia com a evaporação das águas oceânicas, onde o vapor resultante é transportado pelas massas de ar. Em condições ideais, o vapor condensa, originando nuvens e, posteriormente precipitando. A água precipitada sobre a superfície terrestre é dispersada de maneiras diferentes: uma fração significativa é retida na camada mais superficial do solo (onde ocorre o primeiro impacto), retornando para atmosfera por meio da evaporação e da transpiração da vegetação (evapotranspiração); outra parte acaba escoando superficialmente ou se infiltra nas camadas mais profundas do solo, depositando-se em corpos d'água; por fim, uma outra parcela percola solo abaixo, contribuindo para a recarga do lençol freático (Villela e Mattos, 1975).

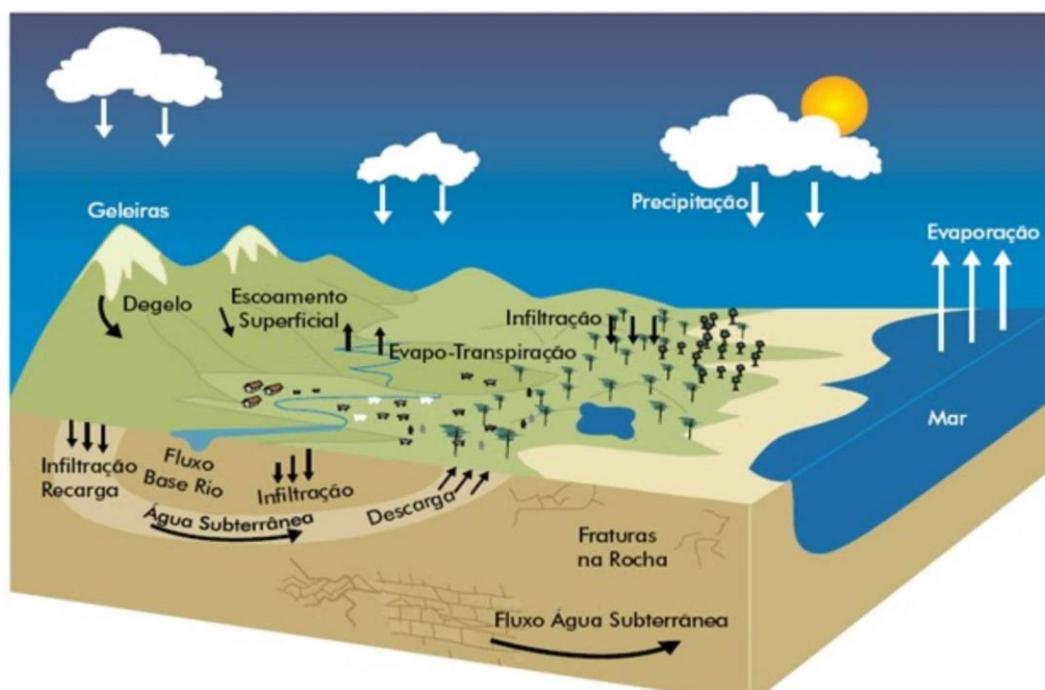


Figura 1: Representação do Ciclo Hidrológico (CESAMA – água é vida. “Água no Planeta”. Disponível em: <https://www.cesama.com.br/pesquisa-escolar/agua-no-planeta>. Acesso em: 1 Abr. 2025).

Considerando essas etapas, segundo Villela e Mattos (1975), o comportamento do ciclo da água pode ser resumido em dois segmentos: o primeiro conta com as etapas iniciais, ou seja, evaporação das águas oceânicas e continentais para atmosfera, condensação, precipitação, escoamento, evaporação; e o segundo é caracterizado por processos paralelos que ocorrem

simultaneamente, por exemplo, a movimentação da água na superfície, sem precisar do seu retorno ao oceano. Na Figura 2, pode-se observar um esquema dos escoamentos que fazem parte do volume de controle para a aplicação na equação hidrológica (1).

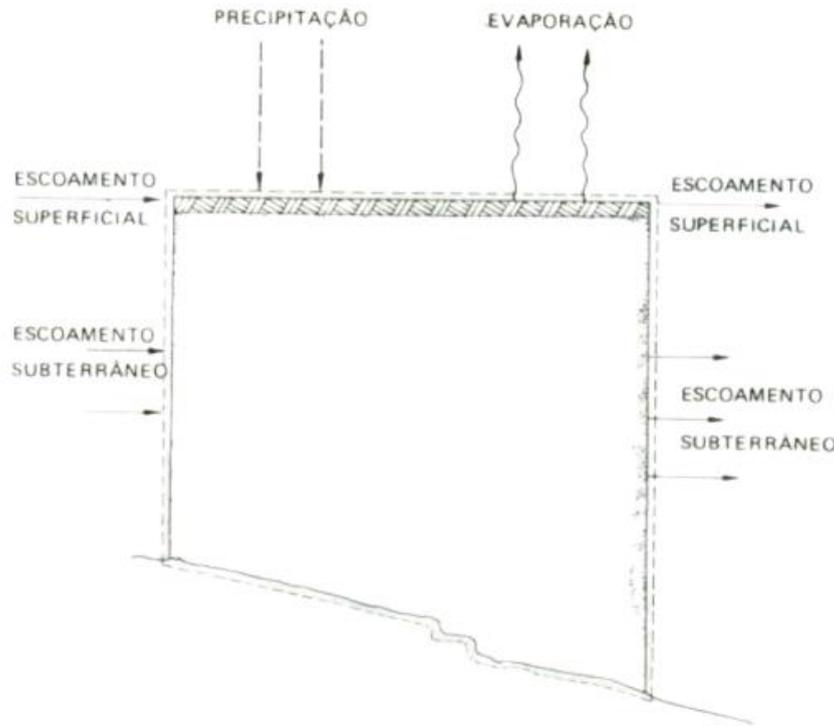


Figura 2: Esquemática do volume de controle (VILLELA e MATTOS ,1975, Hidrologia Aplicada, Cap.1, p. 3, Ciclo Hidrológico).

Sendo assim, o ciclo hidrológico é descrito (Equação 1):

$$I - O = \Delta S \quad (1)$$

I: “Inflow”, ou seja, fluxo de entrada;

O: “Outflow”, ou seja, fluxo de saída;

ΔS : Variação no armazenamento de água.

O fato é que, não se pode simplificar o transporte da água durante todo ciclo sem ponderar todas as nuances dessa movimentação, considerando que o corpo hídrico pode se comportar de diversas maneiras, dependendo de fatores como, tempo, clima, composição vegetal no solo, tipo do solo, granulometria, e diversos outros (Villela e Mattos, 1975).

3.2 Precipitação

O fenômeno da precipitação é descrito como toda água originada do vapor atmosférico que incide sobre a superfície terrestre, ocorrendo de diversas maneiras, sejam elas chuva,

granizo, neve, neblina, orvalho ou geada, dependendo apenas do estado que a água se encontra (Pinto et al, 1976; Tucci, 1997).

Essa etapa, é uma das mais relevantes para o ciclo hidrológico, tendo em vista que constitui o principal mecanismo de transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre (Tucci, 1997). Após a condensação, a água precipitada pode seguir diferentes trajetos: infiltrar-se no solo (podendo percolar até o lençol freático, ou ser absorvida pela vegetação), gerar escoamento superficial, ou retornar à atmosfera por meio dos processos de evapotranspiração (Pinto et al, 1976).

Logo, a precipitação é essencial para gerenciar a disponibilidade de água, que desempenha um papel vital na preservação dos ecossistemas, nas atividades humanas, e no estudo dos padrões climáticos em cada localidade. As oscilações nesse fenômeno são também responsáveis pelo desequilíbrio hídrico das bacias hidrográficas, impactando elementos como a vegetação e a saúde dos ecossistemas, tanto aquáticos quanto terrestres (Patriota, 2024).

A formação da precipitação está intrinsecamente ligada à movimentação das massas de ar, essas influenciadas pelos fatores de convecção térmica, relevo e ação frontal das massas. Esses movimentos atmosféricos resultam no resfriamento do ar, que pode levar ao ponto de saturação, desencadeando a condensação do vapor d'água e, conseqüentemente, formando nuvens ou neblinas (Pinto et al, 1976).

Os tipos de precipitação são classificados a seguir, conforme o fator que provoca a ascensão da massa de ar:

- **Frontais:** Ocorrem ao longo de uma linha de descontinuidade, de tal forma que segrega duas massas de ar com características distintas (Pinto et al, 1976). A interação acontece entre as massas de ar frias e quentes, onde o ar quente e úmido se eleva e esfria, condensando em vapor d'água e precipitando (Tucci, 1997).
- **Orográficas:** Neste tipo, os ventos soprados do oceano em direção ao continente, defrontam-se com cadeias montanhosas, eles se elevam e se resfriam, levando à condensação do vapor d'água, à formação de nuvens e, conseqüentemente à precipitação. No entanto, o lado oposto à barreira (montanha) experimenta a sombra pluviométrica, tornando-se uma região seca ou semiárida devido ao ar seco remanescente após a liberação da umidade na encosta anterior (Tucci, 1997).

- **Convectivas:** A diferença de temperatura na superfície terrestre, resulta no surgimento de camadas de ar com densidades distintas, provocando uma estratificação térmica instável da atmosfera. Interrompido esse equilíbrio, fatores como ventos intensos ou o aquecimento excessivo, gera a ascensão rápida e turbulenta do ar menos denso, que pode alcançar altitudes elevadas (Barbosa Jr., 2022).

Considerando a diversidade de processos atmosféricos responsáveis pela formação da precipitação, bem como suas distintas classificações e características, torna-se imprescindível compreender os fatores que influenciam esse fenômeno, sejam eles de forma direta ou indireta. A complexidade das interações entre eles, moldam não apenas a quantidade de precipitação, mas também sua distribuição temporal e espacial em diversas regiões.

Os sistemas atmosféricos, como frentes frias e zonas de convergência, desempenham um papel fundamental no processo de formação de chuvas. Por exemplo, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) são determinantes para os padrões de precipitação, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais do Brasil (Santos et al., 2010). A movimentação dessas zonas pode resultar em períodos de alta precipitação, enquanto a sua ausência pode levar a secas severas (Maier e Simões, 2012; Nery, 2017).

Outro fator significativo é a elevação do relevo, que gera um efeito orográfico na precipitação. Locais com altitudes elevadas, como algumas áreas da Serra do Cadeado – Paraná [que variam de 750 a 1300m acima do nível do mar (Langer et al, 2009)], apresentam maior concentração de chuvas devido ao levantamento do ar úmido que esfria e condensa em altitudes mais elevadas (Maier e Simões, 2012; Nery, 2017). Além disso, a localização geográfica também afeta a precipitação, com regiões litorâneas frequentemente recebendo chuvas mais intensas do que áreas internas, devido à influência da umidade proveniente do oceano (Silva et al., 2018).

Os fenômenos climáticos de larga escala, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) estão associados a variações significativas nos padrões de chuvas, podendo conferir condições mais úmidas ou secas em diferentes épocas (Reboita et al., 2010). Estudos observaram que a ocorrência de eventos de El Niño pode desencadear chuvas intensificadas em algumas partes do Brasil, enquanto em outros locais, como o Sul, pode ocorrer a redução das precipitações (Pampuch; Ferraz, 2012; Reboita et al., 2010).

Ademais, as condições oceanográficas, como a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), têm correlação com a precipitação. Anomalias de TSM afetam a umidade disponível no ar, influenciando diretamente a formação de nuvens e a ocorrência de chuvas (Gruppelli et al., 2008; Cataldi et al., 2010). As variações na temperatura do oceano podem alterar a dinâmica atmosférica, levando a desvios significativos nos regimes pluviométricos (Cataldi et al., 2010; Souza et al., 2017).

A precipitação pode ser medida por diferentes métodos, sendo os dados de campo considerados a principal referência para validação de estimativas remotas. Medições diretas são tradicionalmente realizadas com o uso de pluviômetros manuais ou automáticos instalados em estações meteorológicas, operadas por instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a Rede Hidrometeorológica Nacional (ANA), fornecendo dados contínuos e de alta confiabilidade (Alvares et al., 2013).

Além disso, tecnologias de sensoriamento remoto, como radares meteorológicos e sensores embarcados em satélites, têm se destacado pela capacidade de monitorar grandes áreas com alta frequência temporal. No entanto, mesmo com os avanços tecnológicos, os dados de campo ainda desempenham papel essencial como base para calibração e validação de modelos climáticos e produtos derivados de satélite, conferindo maior rigor científico às análises hidrometeorológicas.

Em suma, a precipitação é um fenômeno multifatorial, cuja dinâmica é moldada pela interação de sistemas atmosféricos, características geográficas, fenômenos climáticos de larga escala e condições oceanográficas. A compreensão desses fatores é essencial para a previsão meteorológica e gestão dos recursos hídricos, dado o seu impacto profundo nas atividades sociais e econômicas.

3.2.1 Regimes de Precipitação no Brasil

O território brasileiro apresenta elevada diversidade climática, resultando em distintos regimes de precipitação distribuídos espacialmente. Essa variabilidade está associada à posição geográfica de cada área (latitude, longitude e altitude), à atuação de diferentes sistemas atmosféricos (como frentes frias, Zonas de Convergência e massas de ar tropicais e equatoriais), bem como às características regionais de relevo (orografia) e cobertura vegetal (Alvares et al., 2014).

Esses padrões de precipitação exercem influência direta sobre a dinâmica da umidade do solo, afetando processos como infiltração, recarga dos aquíferos e disponibilidade hídrica para os ecossistemas. Dessa forma, a compreensão dos regimes de chuva torna-se fundamental para a análise da variabilidade da umidade nos diferentes biomas brasileiros, sobretudo quando associada à utilização de dados orbitais, que possibilitam o monitoramento contínuo desses fenômenos em múltiplas escalas temporais e espaciais (Espinoza et al., 2011; Ribeiro et al., 2021).

Os diferentes biomas brasileiros apresentam regimes de precipitação distintos, que são fundamentais para a manutenção das suas respectivas ecologias e para as atividades humanas. O entendimento dessas variabilidades é crucial para desenvolver políticas de gestão ambiental e conservação, especialmente frente às mudanças climáticas que já afetam significativamente a distribuição e intensidade da precipitação no Brasil.

Segundo Alvares et al. (2014), o clima equatorial (Af – Classificação Climática de Köppen) é predominante na Amazônia (82,3%), caracterizado por uma curta estação chuvosa ou chuvas torrenciais distribuídas ao longo do ano e temperaturas extremas. Os valores de precipitação variam entre 1900 mm e 2400 mm no extremo norte, podendo alcançar 3000 a 4000 mm na região mais ao sul da capital de Belém. No entanto, a variabilidade climática relacionada às anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) tanto no Atlântico Tropical Norte quanto nos eventos de El Niño pode causar secas extremas, como as registradas na bacia do alto Rio Solimões em 1995, 1998, 2005 e 2010 (ESPINOZA et al., 2011).

O bioma Caatinga é exclusivamente brasileiro e característico predominantemente da Região Nordeste. Apresenta um clima semiárido (BSh – Classificação Climática de Köppen), e possui uma precipitação anual inferior a 800 mm, com alta irregularidade na distribuição anual de precipitação (Alvares et al., 2014). A região que engloba esse bioma torna-se suscetível a eventos de secas e a seus efeitos, a exemplo de, nos anos de 2009 a 2015, contabilizando o maior percentual de municípios em situação de emergência devido à seca (Ribeiro et al., 2021).

O Cerrado, caracterizado como uma savana tropical, é predominantemente de clima tropical úmido (Aw e Cwa – Classificação climatológica de Köppen), com duas estações principais: um inverno seco e um verão chuvoso com alta precipitação, variando de de 600 a 2200 mm (Alvares et al., 2014).

A Mata Atlântica, devido à sua extensa faixa latitudinal e influência da maritimidade, apresenta uma diversidade de tipos climáticos (Af, Am, Aw, Cfa, Cfb, Cwa) conforme Alvares et al. (2014), resultando em regimes pluviométricos variáveis, mas com áreas costeiras tipicamente úmidas. A distribuição é bastante sazonal, com um acentuado pico de chuvas no verão. Este bioma é vital para a manutenção da biodiversidade e dos recursos hídricos, com a umidade contribuindo para a riqueza de flora e fauna (PENNEREIRO et al., 2018).

No Pampa, o clima subtropical úmido (Cfa e Cfb - Classificação Climatológica de Köppen), que proporciona uma distribuição com chuvas mais distribuídas ao longo dos meses e menor sazonalidade em comparação com as outras regiões, segundo Alvares et al. (2014).

Por fim, o Pantanal, inserido na bacia do Alto Paraguai, possui um clima sazonal, classificado por Alvares et al. (2014) como Aw e Am (Classificação Climatológica de Köppen), e uma precipitação média anual de 1396 mm, concentrada principalmente na área do planalto. O regime de chuvas na bacia hidrográfica do Pantanal afeta fortemente sua dinâmica hidrológica, e a extensa planície de inundação funciona como um regulador do fluxo de água através da sedimentação e liberação de água na estação seca (Gonçalves et al., 2011).

Para resumir, a precipitação no Brasil é altamente complexa e variável, com aspectos distintos em cada bioma, impulsionados por fatores climáticos globais e regionais (Alvares et al., 2014; Espinoza et al., 2011; Gonçalves et al., 2011; Ribeiro et al., 2021). A alta frequência de secas severas experimentadas nos últimos anos chama a atenção para a alta vulnerabilidade às variações climáticas de alguns biomas, como a Caatinga. Uma compreensão integrada das características da precipitação e dos fatores que a controlam em cada bioma é crítica para adaptar e mitigar os desafios decorrentes das mudanças.

3.3 Infiltração e armazenamento de água no solo

A infiltração refere-se ao processo pelo qual a água se desloca para o interior do solo, atravessando seus poros, sob influência da gravidade, até alcançar uma camada menos permeável, onde passa a ser armazenada, constituindo a água do solo. Esta etapa ocorre em duas zonas: de areação, abrangendo as fases de intercâmbio e descida; e a de saturação, correspondente à fase de circulação, competente às águas subterrâneas (Pinto et al., 1976).

O fenômeno dividi-se em três etapas: fase de intercâmbio, onde a água permanece retida na camada mais superficial do solo, podendo sofrer os efeitos da evaporação ou, ser absorvida pelas raízes da vegetação; a próxima, é a fase de descida, onde a água desloca-se verticalmente pelo solo quando a força gravitacional é maior que a adesão e a capilaridade, até encontrar limitação em uma camada com permeabilidade reduzida; por último, na fase de circulação, a água acumulada forma os lençóis subterrâneos, estes definidos em lençol freático ou lençol cativo (Pinto et al., 1976).

Para entender essa relação e o processo que resulta na obtenção da capacidade de infiltração, é necessário considerar os parâmetros da porosidade e da saturação do solo, e o teor de umidade. O que aponta o espaço disponível para a percolação da água advinda da

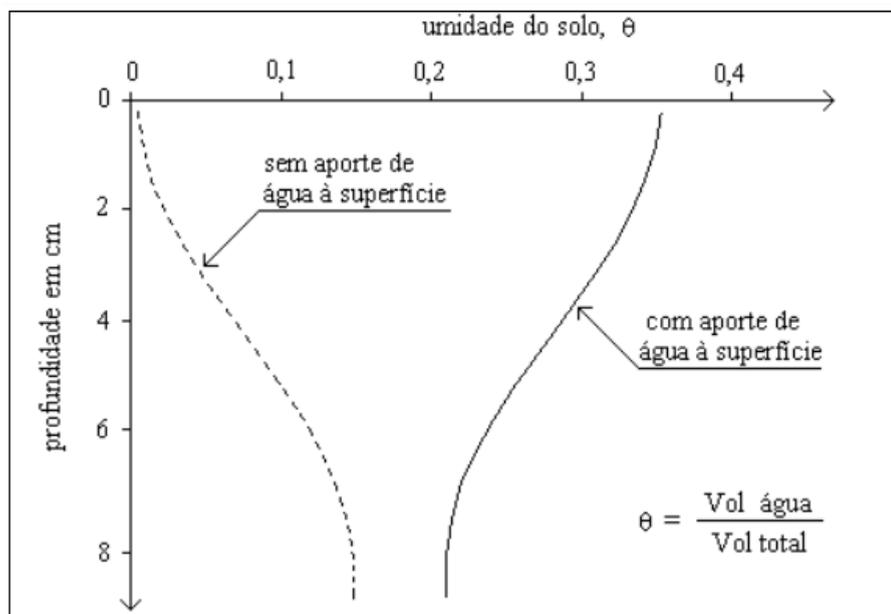


Figura 3: Evolução do perfil do solo (Barbosa Jr, 2022, Elementos de hidrologia aplicada, Cap. 4, p. 120, Infiltração.)

precipitação, é a porosidade, ou seja, os vazios entre as partículas que constituem o solo, capaz de apontar a retenção máxima de água do solo. A umidade, pode ser obtida pela relação do volume de água que incide no solo, pelo volume do solo, e será sempre maior ou igual a porosidade. Por fim, o grau de saturação trata do volume total da água pelo volume de vazios (Barbosa Jr., 2022).

Conforme a água infiltra, as camadas superiores do solo se tornam progressivamente mais úmidas, resultando em uma alteração gradual do perfil de umidade. Esse processo ocorre de tal maneira que a umidade tende a aumentar em profundidade, sendo a saturação atingida primeiro na superfície. Todavia, no decorrer da precipitação, a saturação de todo o perfil do solo pode não ser atingida, sendo insuficiente, e se limitando apenas às camadas mais próximas da

superfície. Desta forma, estabelece-se um padrão característico, em que o teor de umidade diminui com o aumento da profundidade (Tucci, 1997).

Quando a infiltração é interrompida, a umidade armazenada no solo se rearranja internamente, resultando em um perfil invertido, com valores mais elevados nas camadas mais profundas e menores nas mais superficiais (Figura 6), outra parte é transferida para atmosfera pelo processo de evapotranspiração (Tucci, 1997).

3.3.1 Capacidade de infiltração

A capacidade de infiltração do solo é um fator crucial no entendimento do ciclo hidrológico, influenciando etapas como: armazenamento de água, escoamento superficial e recarga dos aquíferos. Esta, engloba a diferenciação do potencial de armazenamento de água no solo, pela lâmina infiltrada por unidade de tempo, da taxa real de infiltração (Tucci, 1997). Essa capacidade pode ser expressa em diversas unidades, a exemplo de milímetros por hora, milímetros por dia ou metros cúbicos por metro quadrado por dia (Pinto et al., 1976).

Para o estudo desta etapa, deve-se diferenciar os conceitos de capacidade e o de taxa real (de infiltração). A taxa real só ocorre quando existe precipitação suficiente para a água percolar no solo, conseqüentemente, a curva da mesma só irá coincidir com a de capacidade, apenas quando o escoamento for maior ou igual à capacidade de infiltração (Barbosa Jr., 2022).

A infiltrabilidade só será atingida quando a intensidade (i) da precipitação for alta suficientemente ao ponto de superar a capacidade do solo de reter a água (Pinto et al., 1976), quando não, a retenção não atinge o seu máximo, diminuindo a capacidade de infiltração (f) aos poucos, pois a água penetrará facilmente, conforme o solo fica mais úmido. Por fim, a fração de precipitação que não penetrou, escoou pela superfície para a parte mais baixa do terreno (tendo, $i - f =$ escoamento superficial) (Barbosa Jr., 2022).

Como descrito anteriormente, uma vez que a precipitação tenha cessado e não puder mais manter qualquer fonte de suprimento de água para a superfície, a taxa de infiltração tende a zerar, ao mesmo tempo que a capacidade de infiltração aumenta novamente, de maneira que o solo perca a umidade retida para as camadas mais profundas do solo (Barbosa Jr., 2022).

3.3.2 Fatores que influenciam na capacidade de infiltração

O processo de infiltração não ocorre de maneira isolada, assim como todo ciclo hidrológico depende de fatores que a influenciam diretamente ou indiretamente, que podem ser divididos em:

- **Tipo de solo:** A capacidade de infiltração está intimamente ligada aos vazios (poros) entre uma partícula e outra do solo, assim como ao tamanho das mesmas e à condição de fissuração das rochas (Pinto et al., 1976). Sendo assim, existe uma variabilidade na infiltrabilidade dependendo do tipo de solo que está sendo estudado, onde, por exemplo, solos secos apresentam uma capacidade de infiltração inicial mais elevada (Villela e Mattos, 1975) e um grau de umidade menor àquela observada em solos úmidos ou saturados. Portanto, a presença de uma fina camada superficial, com aproximadamente 1 cm de espessura, exerce uma influência significativa sobre a infiltração (Pinto et al., 1976).
- **Grau de umidade do solo:** O nível de umidade do solo afeta diretamente a capacidade de infiltração (Pinto et al., 1976). Solos secos demonstram uma capacidade inicial de infiltração que supera a de solos úmidos ou saturados. À medida que a umidade do solo aumenta durante o processo de infiltração, observa-se uma tendência de diminuição gradual dessa capacidade (Villela e Mattos, 1975).
- **Ação da precipitação sobre o solo:** Quando ocorre a precipitação, ao cair no terreno, essa ação gera impactos que provocam a compactação da camada mais superficial do solo, resultando na redução da capacidade de infiltração. Ademais, as águas pluviais podem destacar e transportar materiais finos que, ao se sedimentarem, contribuem para a diminuição da porosidade superficial. Outro impacto gerado é a saturação da superfície do solo e, conseqüentemente, um aumento da resistência à penetração da água. A intensidade desse efeito varia em função da granulometria do solo, sendo mais acentuada em solos de menor tamanho de partícula (Pinto et al., 1976).
- **Altura de retenção superficial e espessura da camada saturada:** A infiltração de água no solo ocorre devido à ação da gravidade, que possibilita o escoamento pela rede de cavidades tubulares presentes nos horizontes do solo, formados entre as partículas do mesmo (Pinto et al., 1976).

- **Compactação:** Taxas inferiores de infiltração são consequências de fatores como a compactação do solo, aumentando os riscos de escoamento superficial e de inundações, principalmente em áreas urbanas, onde a impermeabilização do solo é recorrente (Yang e Zhang, 2011). Um estudo realizado por Gregory et al. (2006), analisou os efeitos da compactação do solo urbano na taxa de infiltração e observou-se que a mesma pode ser reduzida em até 99% em comparação com solos não compactados.
- **Cobertura vegetal:** No ciclo hidrológico como um todo, a vegetação influencia (de maneiras diferentes) em cada etapa do mesmo. Em relação à capacidade de infiltração, a cobertura vegetal desempenha um papel fundamental na infiltração, uma vez que ajuda a mitigar ou eliminar os efeitos da compactação provocada pela chuva (Pinto et al., 1976).
- **Temperatura:** A temperatura do água e do solo desempenham um papel significativo na taxa de infiltração, influenciando fatores relacionados tanto a água quanto ao solo. Alguns estudos demonstram que a partir do aumento da temperatura da água, devido à redução da viscosidade da mesma e outros fatores que ainda são estudados, a taxa de infiltração pode aumentar (Duley e Domingo, 1944). Experimentos utilizando modelagem hidrológica demonstraram que a infiltração pode aumentar em até 300% quando a temperatura varia de 5°C a 60°C (Constantz e Murphy, 1991).
- **Presença do ar:** O ar presente nos vazios do solo pode ser temporariamente retido e comprimido pela água que infiltra, o que tende a atrasar o processo de infiltração. (Pinto et al., 1976).

Dessa forma, observa-se que a infiltração da água no solo é resultado da interação complexa entre propriedades intrínsecas do solo, condições ambientais e fatores externos. Elementos como textura, estrutura, compactação, teor de umidade, cobertura vegetal e variações de temperatura atuam de maneira integrada, influenciando tanto a taxa quanto a profundidade de infiltração ao longo do perfil.

Além disso, aspectos dinâmicos como a intensidade das precipitações e o transporte de partículas finas contribuem para a modificação contínua das condições superficiais, afetando a porosidade e a condutividade hidráulica do solo. Compreender esses mecanismos é essencial para a gestão dos recursos hídricos, para a conservação do solo e para o planejamento de usos

sustentáveis do território, especialmente diante de cenários de intensificação do uso da terra e variabilidade climática.

3.4 Solo

3.4.1 Formação do Solo

O solo é um recurso finito que sustenta todo o ecossistema terrestre, viabilizando processos como a produção da subsistência, a ciclagem de nutrientes ligados ao desenvolvimento ambiental, econômico e social de todas as populações ecossistêmicas. Sendo assim, para que a sustentabilidade seja implementada de forma efetiva, deve-se entender as nuances de cada tipo de solo, sua formação e todos os dados que podem ser levantados para o uso do mesmo e de correlatos climatológicos, que contribuem para o melhor comportamento do ciclo hidrológico.

Durante a formação do solo, existe a atuação de cinco fatores que se relacionam entre si: material de origem, relevo, clima, tempo e organismos. Cada um destes, atua de forma direta ou indireta na pedogênese, de tal forma que as características do solo em qualquer ponto da paisagem refletem a interação dinâmica e contínua entre esses elementos ao longo do tempo.

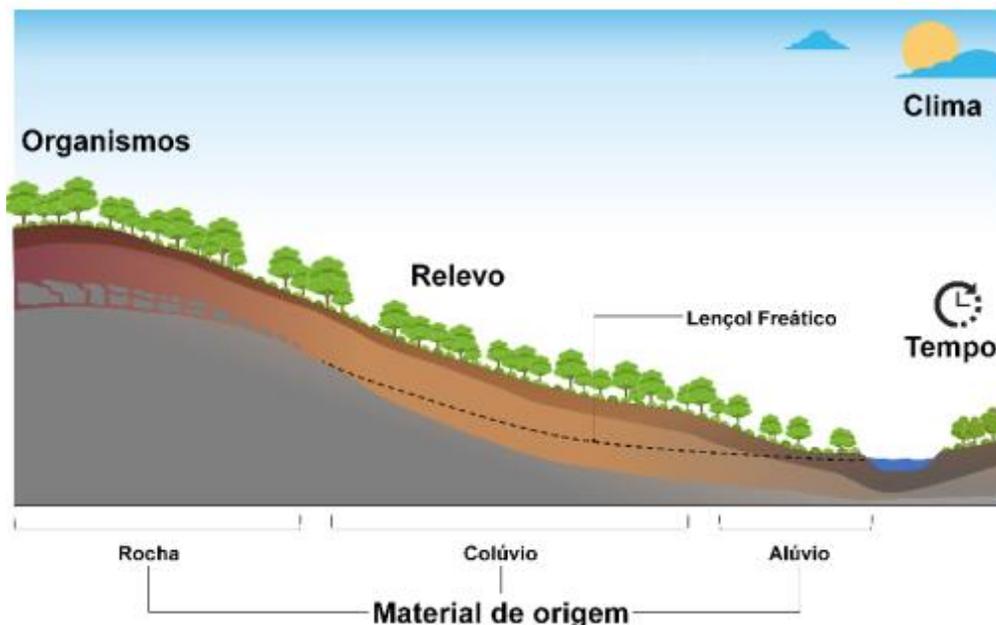


Figura 4: Representação dos fatores de formação do solo (PEREIRA et al, 2019, Cap. 1, p. 5, Formação e caracterização dos solos).

Os processos de intemperismo, que incluem tanto a degradação física quanto química da rocha ou do sedimento (materiais de origem), são fundamentais no estágio de formação do solo. As rochas representam a base mineral da maioria dos solos, e suas características — tais como composição química, mineralogia, textura e coloração — condicionam diretamente os atributos físicos e químicos dos perfis formados a partir delas (Brady e Weil, 2013).

As rochas ácidas, com teor de sílica superior a 65%, são ricas em minerais aluminosos, e alteração desses materiais tende a originar solos de textura mais arenosa, coloração amarelada e baixa fertilidade. No entanto, as rochas com menor teor de sílica (inferior a 52%) e maior concentração de minerais ferromagnesianos, denominadas básicas, originam solos argilosos, com tonalidade avermelhada e maior potencial de fertilidade (Fontes, 2012).

Os sedimentos constituem outra importante fonte de material de origem e resultam da desagregação e transporte de rochas por meio de processos erosivos. Podem ser classificados de acordo com o agente transportador e o local de deposição. Os sedimentos coluviais são provenientes da movimentação gravitacional de materiais intemperizados em encostas, enquanto os aluviais correspondem à deposição fluvial em áreas de várzea, geralmente com grande variabilidade de textura e composição (Suguio, 2003).

Além dos materiais minerais, há também a ocorrência de sedimentos orgânicos, e esse tipo de material tende a se acumular em condições de saturação hídrica, ou mesmo em ambientes bem drenados onde a produção de matéria orgânica excede sua decomposição. O acúmulo desses sedimentos em depósitos dá origem aos organossolos, típicos de ambientes com condições de drenagem restrita e alta umidade (Pereira et al, 2019).

Outro fator que desempenha um papel importante para a organização da dinamicidade da água, a fins de escoamento, lixiviação de solutos, infiltração e processo erosivos, é o relevo (Anjos et al., 1998). A infiltração e a drenagem do solo são influenciadas pela posição na paisagem e pela proximidade do lençol freático, onde áreas mais elevadas favorecem-na devido à boa drenagem, enquanto terrenos inclinados, embora bem drenados, tendem a aumentar o escoamento superficial e a erosão. Contudo, nas porções mais baixas, a proximidade com o espelho d'água subterrâneo limita a drenagem, resultando em solos frequentemente saturados. (Pereira et al., 2019).

Do mesmo modo, o clima exerce influência direta e indireta sobre os processos de intemperismo e a evolução dos perfis. As variáveis climáticas mais relevantes para a dinâmica

do solo incluem precipitação, temperatura e evaporação potencial, pois afetam o suprimento de água, a mobilidade dos elementos e a velocidade das reações químicas no solo (Kämpf e Curi, 2012). As reações de hidrólise são promovidas através da participação ativa da água da chuva, contribuindo para a decomposição do material parental (original) e a liberação de solutos que podem ser removidos por processos de lixiviação. De acordo com Fontes (2012), a água também atua na translocação, adição e remoção de constituintes no perfil, interferindo diretamente na diferenciação de horizontes e na formação de novos minerais secundários.

Ademais, a temperatura afeta indiretamente os processos pedogenéticos, uma vez que participa do controle da taxa de reações químicas e físicas (intemperismo). Em localidades mais próximas dos trópicos, onde o índice de precipitação é mais alto, assim como os valores de temperatura, o intemperismo é mais alto (Fontes, 2012), ocorrendo então a formação de solos profundos e bastante intemperizados. Em lugares com dinamicidade hidrológica e térmica contrárias, os solos não possuem maturidade, com menos intemperismos (Pereira et al., 2019).

A ação do tempo está relacionada ao estágio de desenvolvimento e ao nível de evolução alcançado pelo perfil durante a ação dos processos pedogenéticos (Kämpf e Curi, 2012). Solos em climas caracterizados por condições áridas e semiáridas, que experimentam precipitação limitada, podem ainda ser jovens em seu desenvolvimento e formação de horizontes, mesmo quando o material de origem está intemperizado há muito tempo. Diferentemente disso, em ambientes com condições climáticas mais úmidas e altas temperaturas, os processos de intemperismo são mais intensos, podendo resultar em perfis de solo mais profundos e com alteração da sua composição mineral (Pereira et al., 2019).

Além disso, a atuação dos organismos na formação dos solos está diretamente associada às condições climáticas, especialmente aos regimes de umidade e temperatura que determinam a adaptabilidade da fauna e da flora aos diferentes ambientes. Esse fator é considerado essencial na pedogênese, diferenciando-se do intemperismo físico-químico por participar da atividade biológica como elemento de ação do substrato.

Nesse sentido, outro fator que contribui para a formação do solo, é a presença de cobertura vegetal, que contribui com a adição contínua de matéria orgânica por meio da deposição de resíduos orgânicos — como folhas, galhos e raízes. Essa matéria é decomposta pela ação de organismos como minhocas, formigas, cupins e microrganismos, os quais desempenham papel ativo na formação e estabilização dos agregados do solo. Logo, favorecendo o aumento da

porosidade, a melhoria da estrutura e a formação de horizontes mais escuros, ricos em húmus. Ainda mais, a atividade biológica influencia diretamente na infiltração da água, na retenção de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal e na redução da suscetibilidade à erosão, promovendo maior estabilidade do perfil superficial (Pavinato e Resolem, 2008).

3.4.2 Caracterização do Solo

Considerando os processos pedogenéticos previamente descritos na seção 3.4.1, a caracterização do solo de uma área revela informações importantes sobre os caminhos evolutivos que moldaram a sua constituição atual. O solo por sua vez, como apresentado, forma-se através do intemperismo de rochas e sedimentos, formando o regolito – base fundamental da pedogênese. Durante esse processo de constituição, o material originado passa a se organizar em seções parcialmente paralelas à superfície, tais seções são denominadas horizontes (Pereira et al, 2019).

Por outro lado, as camadas não são, quase ou inteiramente, frutos dos processos de pedogênese, onde suas características primárias são herdadas do material original ou devido a outros fatores pedogenéticos. Em suma, o perfil nada mais é que a visão vertical do conjunto de horizontes e camadas, e a partir da análise de seus atributos morfológicos, é possível compreender melhor o sistema de formação daquele terreno, como classificá-lo e como fazer o manejo e recuperação de forma correta (Pereira et al, 2019).

De acordo com Pereira et al (2019), os horizontes do solo são divididos (Figura 8) em A, E, B; as nomenclaturas O, H, C, F são atribuídas de acordo com a formação do solo, para as camadas ou os horizontes; já o R é atribuído apenas às camadas. Cada classificação é atribuída de acordo com análise de amostras, são as mais significativas (Figura 8):

- **O e H:** São atribuídos a solos orgânicos, a distinção entre ambos se baseia no regime hídrico do ambiente em que se formam, sendo “O” designado para solos com boa drenagem, e “H” para solos com capacidade de drenagem ineficiente.
- **A:** Horizontes mais superficiais, com alto teor de matéria orgânica, possui tonalidade escura, e sua estrutura é composta por grãos. Subdivide-se em A e AB, de acordo com as características genéticas. O subhorizonte A trata-se da porção mais superficial, com grau de densidade menor, assim como o teor de argila e estrutura granular bem desenvolvida, favorecendo a aeração, infiltração de água e ancoragem das raízes.

- **E:** Este horizonte é caracterizado pela movimentação e transporte de materiais (orgânicos e minerais), apresentando coloração clara e grãos mais arenosos (Pereira et al, 2019).
- **B:** Se apresenta subsuperficialmente — ou, em alguns casos, à própria superfície quando o horizonte superior é removido por erosão. Neste horizonte, destacam-se propriedades desenvolvidas por processos pedogenéticos ativos, que sobrepõem as características originalmente herdadas do material de origem. Considerado base da classificação do perfil do solo, é subdividido em BA, B e BC (Pereira et al, 2019).
- **C:** Composto por material mineral que sofreu pouco ou nenhum intemperismo, o horizonte C é localizado imediatamente sobre o substrato rochoso, ou formado a partir do material de origem (sedimentos). Apresenta características morfológicas do material originário, mantendo propriedades físicas e estruturais semelhantes ao do substrato. Pode ser subdividido em C1, C2, C3, entre outros, sendo o C1 associado à gênese pedogenética, enquanto os demais representam variações posicionais no perfil ou diferentes estratos sedimentares sem implicação genética direta (Pereira et al, 2019).
- **F:** O horizonte F refere-se à presença de camadas endurecidas por acúmulo de ferro, conhecidas como petroplintita, esses processos de formação podem ocorrer de forma contínua ou quase contínua (Pereira et al, 2019).
- **R:** Designa o substrato rochoso consolidado, ou seja, a rocha matriz propriamente dita (Pereira et al, 2019).

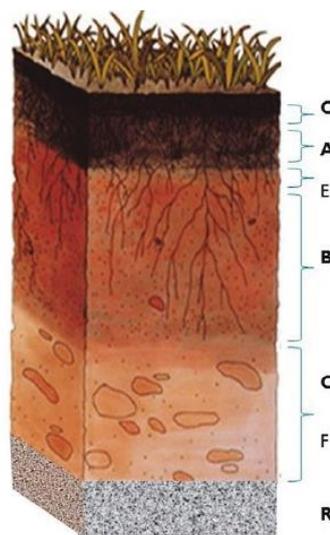


Figura 5: Representação dos horizontes do solo (ADAPTADO, Solo e suas características, Disponível em: <https://promilitares.com.br/concursos-militares/conteudo/solos-e-suas-caracteristicas/>)

A descrição dos horizontes permite compreender a organização vertical dos perfis e os processos que atuaram na formação do solo. Sendo assim, torna-se possível o estudo e a setorização em cada tipo de solo, permitindo análises mais complexas e com a participação de dados de outras variáveis, principalmente climáticas.

Considerando a fundamentação dos horizontes, é possível também designar classes para a profundidade de cada camada/horizonte. A profundidade varia significativamente entre diferentes tipos de solo, influenciada por uma série de fatores ecológicos e geográficos, e a partir desse sistema de classes, é possível avaliar onde ocorre cada horizonte. A seguir, segundo Santos et al (2018), classifica-se da seguinte maneira (Tabela 1):

Classe	Profundidade
Raso	≤ 50 cm de profundidade
Pouco Profundo	> 50 cm ≤ 100 cm de profundidade
Profundo	> 100 cm ≤ 200 cm de profundidade
Muito Profundo	> 200 cm de profundidade

Tabela 1: Classe das profundidades dos solos (SANTOS et al, 2018, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, p. 311, Anexo A)

Para solos em condições climatológicas tropicais, assim como o Brasil, a profundidade geralmente ultrapassa o valor de 200 cm. Quando isso ocorre, o limite inferior é fixado em 200 cm, porém as exceções se aplicam quando o horizonte A tem a medida vertical acima de 150cm e, quando a espessura do horizonte E somada ao do A exceda 200 cm, nesse caso o limite inferior é considerado como 400 cm (Santos et al, 2018).

3.5 Umidade do Solo

A retenção de água no solo é resultante da ação de fenômenos e/ou fatores físicos e químicos. Essa propriedade está relacionada ao caráter dipolar da molécula de água e à presença de cargas elétricas nas superfícies das partículas do solo, o que favorece a orientação e retenção da água. Nesse contexto, destacam-se as forças de adsorção, que englobam os mecanismos de adesão entre a água e as partículas sólidas, bem como a coesão entre as próprias moléculas de água (AGTPEA, s.d.).

A capacidade de retenção de água no solo é condicionada por múltiplos fatores, entre os quais a textura se destaca como o mais influente. Esta, é responsável pela determinação da área de contato entre as partículas sólidas e a água, além de controlar a proporção e o tamanho dos poros presentes no solo. A estrutura, por sua vez, influencia o arranjo das partículas e, portanto, a organização do espaço poroso. Embora a textura esteja relacionada ao tamanho das partículas, a qualidade do material mineral, em especial das frações argilosas, também exerce influência significativa sobre a capacidade de retenção hídrica (Reichardt, 1987).

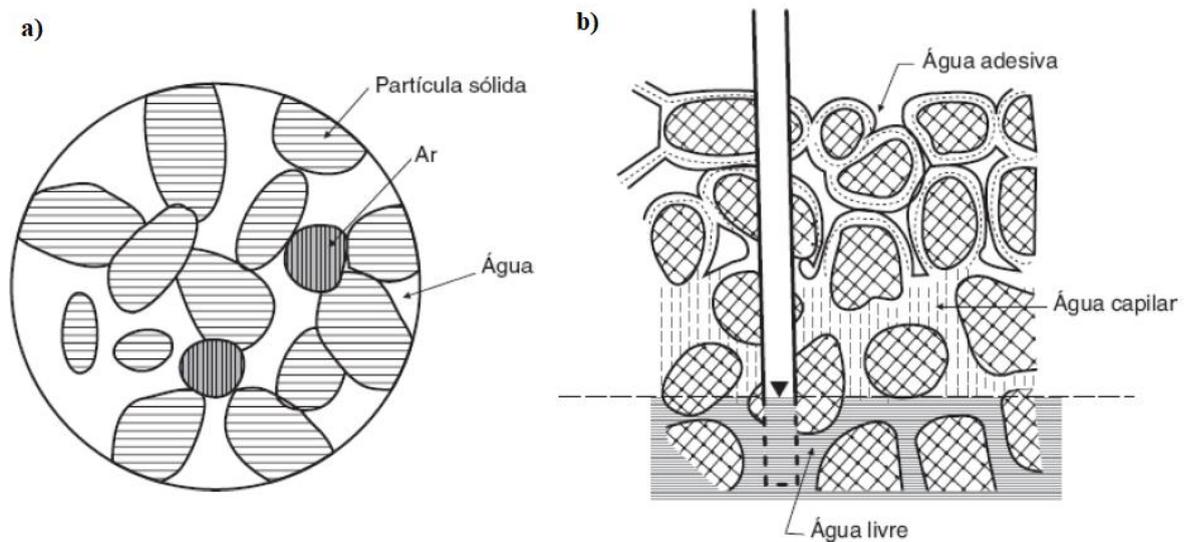


Figura 6: Fases constituintes do solo (a) e Classificação da água no solo (b) (Caputo e Caputo, 2015, Mecânica dos solos e suas aplicações, Cap. 4, p.51 e 52, Índices físicos).

Do ponto de vista físico, o solo é um sistema trifásico composto por partículas sólidas e poros que podem estar ocupados, parcial ou totalmente, por água ou ar (Figura 10a). A água (Figura 10b) presente nesse sistema pode ocorrer em diferentes formas: como água de constituição, integrada à estrutura molecular dos minerais; água adsorvida, que forma películas aderidas às partículas sólidas; água livre, que ocupa os poros apenas em uma região do perfil, e comporta-se conforme os princípios da hidráulica; água higroscópica, que permanece retida em solos secos; e água capilar, retida entre partículas finas por ação das forças capilares (Caputo e Caputo, 2015).

A compreensão dessas formas de ocorrência da água no solo, bem como das relações entre suas fases sólida, líquida e gasosa, é essencial para a análise de suas propriedades físicas. Os índices e proporções que descrevem essas relações auxiliam na avaliação do comportamento do solo sob diferentes condições ambientais e de uso, sendo fundamentais para o estudo e desenvolvimento de processos que proporcionem o manejo adequado do mesmo (Caputo e Caputo, 2015).

A água que se encontra retida no perfil do solo é medida/estimada, e o cálculo para a realização de tal feito tem como resultado o teor de umidade do solo. Umidade à base de peso “U” (Caputo e Caputo, 2015).

$$U\% = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de solo seco em estufa}} * 100 \quad (2)$$

Umidade à base de volume “ θ ” (Caputo e Caputo, 2015):

$$\theta\% = \frac{\text{volume de água}}{\text{volume total do solo}} * 100 \quad \text{ou} \quad \theta\% = U\% * Ds \quad (3)$$

Ds: Densidade do solo

O conhecimento dos mecanismos que controlam a retenção de água no solo é crucial para fins práticos. Uma base sólida de teoria, combinada com técnicas experimentais e observacionais apropriadas ao campo, é necessária para entender a relação entre as propriedades físicas do solo e o movimento da água em suas várias fases. A determinação do teor de umidade no solo é uma prática essencial para o planejamento de atividades agrícolas, por exemplo, sendo especialmente relevante na definição do momento ideal para operações mecanizadas e no manejo racional da irrigação (Kaiser et al., 2010).

Por afetar diretamente a porosidade e a suscetibilidade do solo à compactação, torna-se necessário o uso de equipamentos que possibilitem o acompanhamento espacial e temporal da umidade no perfil. O método convencionalmente adotado é o da secagem em estufa, que consiste na retirada da água por meio de calor e posterior cálculo da umidade gravimétrica, com base na relação entre a massa de água e a massa de solo seco, realizada a partir da seleção de amostrar das diferentes camadas/horizontes do perfil (Klein, 2008). Apesar de ser um procedimento direto e preciso (Santos et al., 2006), seu principal entrave reside no tempo requerido para a obtenção dos resultados, que pode ultrapassar 24 horas.

3.6 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto corresponde a tecnologia que possibilita a obtenção de dados ou imagens da superfície terrestre, seja por meio de plataformas terrestres, aéreas ou orbitais, mas sem a necessidade de contato direto com os objetos presentes nela. A captação desses dados (Figura 10), ocorre a partir da interação da radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida

pelos alvos em diferentes comprimentos de ondas do espectro eletromagnético, que são interpretadas pelos sensores (Florenzano, 2007).

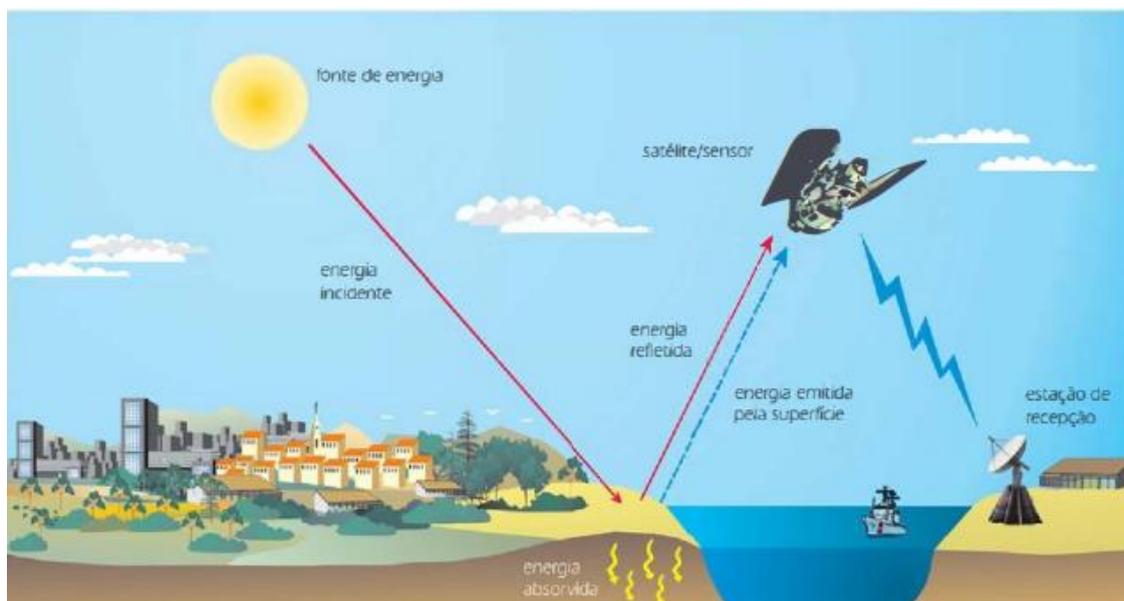


Figura 7: Ilustração da obtenção de dados e imagens por sensoriamento remoto (FLORENZA, 2007, Iniciação em sensoriamento remoto, Cap. 1, p. 9, Fundamentos de Sensoriamento Remoto).

Sensores de radar, classificados como ativos por emitirem sua própria fonte de energia na faixa das micro-ondas, possuem a capacidade de aquisição de imagens tanto em condições diurnas quanto noturnas, independentemente da presença de nuvens ou precipitação. No entanto, sensores ópticos são considerados passivos por dependerem da radiação solar refletida pela superfície. Entre os sensores passivos, destacam-se câmeras fotográficas (quando não utilizadas com flash), câmeras de vídeo e sensores multiespectrais, como o Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat-5 (Florenzano, 2007).

A energia captada pelos sensores eletrônicos é convertida em sinais elétricos, os quais são registrados e transmitidos para estações de recepção em solo. Nesses centros, os sinais são processados e convertidos em dados visuais na forma de gráficos, tabelas ou imagens, possibilitando sua interpretação e análise (Florenzano, 2007). Para aplicações quantitativas, como a estimativa da reflectância da água (ρ_w), os dados passam por conversões radiométricas que visam ajustar interferências atmosféricas e determinar a reflectância de superfície (Barbosa et al, 2019).

Dados obtidos por meio do sensoriamento remoto na faixa do infravermelho termal (TIR) têm sido amplamente utilizados na estimativa de variáveis hidrológicas, como evapotranspiração, evaporação e umidade do solo (Lima Jr. et al., 2024). Pesquisas como a de

Junior et al. (2014) avaliaram diferentes algoritmos voltados à recuperação da umidade superficial do solo, com base em observações por micro-ondas passivas, dados de dispersômetros e sensores térmicos orbitais, evidenciando a complementaridade entre técnicas de sensoriamento em distintas faixas espectrais.

Além dessas aplicações, imagens de satélite desempenham papel fundamental na previsão meteorológica. A análise da cobertura e movimentação das nuvens permite a identificação de áreas com ocorrência de chuvas e a estimativa de sua intensidade, bem como a determinação da direção e velocidade dos ventos a partir da sequência temporal das imagens (Florenzano, 2007).

Vale destacar que a extração de informações quantitativas a partir de dados orbitais, como estimativas de umidade do solo e precipitação, requer a aplicação de modelos específicos e o conhecimento das características radiométricas e espectrais dos sensores utilizados, além da consideração das condições atmosféricas no momento da aquisição (Barbosa et al., 2019).

A umidade do solo, temperatura, precipitação, evapotranspiração, evaporação, uso e ocupação, salinização e outros processos podem ser monitorados espacial e temporalmente via sensoriamento remoto, contribuindo assim para estudos ambientais, gestão agrícola e planejamento territorial.

3.6.1 Produto derivado do sensoriamento remoto para análise de precipitação

O produto *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (IMERG) representa o algoritmo unificado desenvolvido pela equipe norte-americana do programa *Global Precipitation Measurement* (GPM), com o propósito de fornecer estimativas globais de precipitação a partir da integração de múltiplas plataformas orbitais (Rozante e Rozante, 2024). A versão mais recente, o IMERG V07, constitui uma evolução significativa no sistema de precipitação multissatélite, oferecendo dados com resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ e temporal de meia hora (NASA, 2023).

A geração das estimativas de precipitação pelo IMERG V07 é um processo altamente sofisticado, envolvendo a fusão de dados provenientes de diversos sensores passivos de micro-ondas (PMW), integrados na constelação do GPM (NASA, 2023). Essas estimativas são processadas com base no *Goddard Profiling Algorithm* (GPROF2021), resultando em um produto que, embora derivado essencialmente de satélites, alcança elevado grau de confiabilidade por meio da calibração com dados pluviométricos mensais na versão Final Run

(Nepal, 2021). Importante destacar que, por essa razão, o IMERG não se classifica como produto de reanálise tradicional, mas sim como uma estimativa híbrida com aprimoramento por dados observacionais.

No que se refere à sua aplicabilidade para o território brasileiro, o IMERG V07 apresenta avanços relevantes em comparação com versões anteriores, particularmente no que tange à captura dos principais sistemas precipitantes da América do Sul, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os sistemas convectivos de mesoescala (MCS) (Rozante e Rozante, 2024). Segundo Rozante; Rozante (2024), a nova versão (V07B) exibe redução do erro quadrático médio (RMSE) em diversas regiões do país, com destaque para o Sudeste e porções do Norte, além de maior capacidade de mitigar a superestimação em áreas dominadas por nuvens de topo frio.

A versão Final Run do IMERG é especialmente valorizada em estudos climáticos e hidrometeorológicos por incorporar medições de pluviômetros mensais, conferindo-lhe o status de produto de nível de pesquisa (Hsu, 2021). Sua confiabilidade torna-se ainda mais relevante em contextos de escassez de dados observacionais, situação comum em determinadas regiões do Brasil.

Entretanto, como todo sistema baseado em sensoriamento remoto, o IMERG também apresenta limitações técnicas, notadamente em situações atmosféricas associadas a nuvens de topo quente, como aquelas que predominam no leste do Nordeste brasileiro durante o inverno. Nesses casos, tanto a versão V06B quanto a V07B tendem à subestimação da precipitação, com o V07B inclusive intensificando esse viés em certas condições. De modo complementar, há também uma tendência à superestimação em limiares de chuva/não-chuva e para eventos de chuva leve, fenômeno observado em todas as estações do ano (ROZANTE; ROZANTE, 2024).

A performance do IMERG V07B, embora superior em relação à V06B em termos de resolução temporal e espacial e em diversas métricas de precisão, varia regional e sazonalmente. Regiões como o interior do Nordeste (R3) e a costa leste (R4) continuam a representar desafios para a acurácia das estimativas, especialmente nos períodos de inverno e primavera, quando prevalecem sistemas de nuvens quentes com baixa refletividade de micro-ondas (Rozante e Rozante, 2024).

Apesar dessas limitações pontuais, a literatura evidencia que o IMERG — em suas versões mais recentes — constitui uma ferramenta valiosa para o monitoramento da

precipitação no Brasil. Estudos comparativos demonstram que a transição para a versão V07B representa um avanço técnico considerável, principalmente em eventos associados à precipitação intensa, ainda que o aprimoramento contínuo seja necessário para melhor representar as condições específicas das diferentes regiões brasileiras (Rozante e Rozante, 2024).

Em suma, o IMERG V07 destaca-se como um produto de satélite de alta resolução e confiabilidade, particularmente em sua versão Final Run, sendo amplamente aplicável a estudos climáticos e hidrológicos no Brasil. Ainda que apresente limitações em determinados contextos atmosféricos, sobretudo em regiões tropicais sob influência de nuvens de topo quente, seus benefícios superam os desafios, consolidando-o como um recurso essencial para a climatologia e o monitoramento ambiental em escalas regionais e continentais.

3.6.2 Produto derivado do sensoriamento remoto para análise de umidade do solo

O ERA5-Land é reconhecido como uma versão refinada e de alta resolução do componente terrestre da reanálise global ERA5, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Tal aprimoramento decorre da execução independente do modelo de superfície terrestre do ERA5, dissociado do acoplamento com a atmosfera, permitindo assim uma representação mais detalhada das variáveis superficiais ao longo do tempo (Arbegg, 2018). A principal contribuição do ERA5-Land reside em sua capacidade de fornecer dados com resolução espacial superior ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$), aliada a um equilíbrio aprimorado entre precipitação e evaporação em escala global.

A umidade do solo, nesse contexto, não é mensurada diretamente, mas estimada por meio de um complexo sistema de reanálise. Esse processo baseia-se na assimilação de uma ampla gama de observações, provenientes de fontes diversas — com destaque para sensores orbitais — que, integradas a modelos físicos da superfície terrestre, possibilitam a geração de séries temporais consistentes e espacialmente contínuas (Arbegg, 2018; Xu et al., 2021). Em outras palavras, o ERA5-Land representa uma estimativa modelada da realidade hidrológica superficial, ajustada continuamente por dados observacionais.

Entretanto, como todo produto baseado em modelagem e reanálise, o ERA5-Land está sujeito a limitações e incertezas. Estudos apontam a existência de vieses em determinadas regiões, especialmente em zonas tropicais e áreas com elevada variabilidade climática. Em

algumas dessas regiões, observou-se superestimativa dos níveis de umidade do solo, bem como desvios significativos na representação da precipitação (Mahto e Mishra, 2019; Madhavy, 2022).

Além disso, há evidências de que o modelo apresente limitações na reprodução de tendências de longo prazo em variáveis como temperatura e precipitação, o que pode comprometer análises climáticas mais amplas (Mahto e Mishra, 2019). Outro aspecto que influencia a acurácia das estimativas diz respeito à heterogeneidade da cobertura vegetal e à complexidade estrutural da superfície terrestre. Tais fatores podem dificultar a representação precisa da umidade do solo, sobretudo em regiões com práticas agrícolas intensivas, como a irrigação (Mohanty, 2017; Arbegel, 2018).

Apesar das limitações apontadas, o ERA5-Land permanece como uma das ferramentas mais robustas e amplamente utilizadas para o monitoramento da umidade do solo em escala global. Sua produção por uma instituição de renome internacional, aliada à contínua validação frente a observações *in situ* e outros produtos de reanálise, confere-lhe elevada credibilidade no meio científico (ARBEGEL, 2018).

Segundo Deng Y. et al. (2020), quando comparados os dados de umidade entre as fontes de micro-ondas (AMSR-E e ESA CCI), o modelo de superfície terrestre (GLDAS) e os dados de reanálise (ERA-*Interim* e NCEP), e considerando as características particulares de cada, é possível verificar que os dados de reanálise, mais especificamente o ERA-*Interim*, possui uma cobertura de área ampla e dados que se assemelham aos *in situ*, além de melhor performar nas diferentes estações do ano.

No entanto, o produto ESA CCI, é o mais preciso em escalas de tempo e condições climáticas variadas, sendo mais eficiente quando trabalhado com os dados de precipitação. A principal desvantagem do mesmo é a disponibilidade temporal, tendo em vista que os dados só estão disponíveis do ano de 2010 a 2022, além de não estar inserido na plataforma do GEE.

Em um estudo realizado no ano de 2024, foi apresentado a modelagem da umidade de solo utilizando os dados do ERA5-*Land*, juntamente a índices topográficos e medições *in situ*, com o objetivo de prever a formação de sulcos em operações florestais. O modelo previu com sucesso a umidade do solo, com um coeficiente de correlação de Kendall de 0,62 e R² de 64%. A previsão da profundidade dos rastros também foi bem-sucedida, resultando em

um coeficiente de correlação de Kendall de 0,61. Por isso, foi constatado que o ERA5-*Land* é uma fonte confiável de dados de umidade do solo, fornecendo estimativas horárias, diárias ou mensais em uma resolução de 9x9 km e integrando as forçantes atmosféricas (Schönauer M., 2024).

Com objetivo de validar o produto de umidade do solo do ERA5-*Land* usando as medições *in situ* e observações do SMAP entre os anos de 2015 e 2021, o estudo de P. Lal et al (2022) constatou a partir dos resultados da validação que o produto apesar de demonstrar um desempenho menor nas regiões de desérticas e de tundras, apresenta um desempenho razoável em escala global, com um erro padrão da raiz quadrada da diferença média (ubRMSE) de aproximadamente 0.050 m³/m³.

Na plataforma do GEE é possível averiguar cada produto de umidade do solo disponibilizado. Para melhor visualização, foram organizados em tabela e classificados quanto a resolução, cobertura e referência espacial, resolução e cobertura temporal, bem como as citações em que cada um está inserido (Tabela 2):

<i>Nome (Produto)</i>	<i>Descrição</i>	<i>Resolução Espacial</i>	<i>Cobertura Espacial</i>	<i>Referência Espacial</i>	<i>Resolução Temporal</i>	<i>Cobertura Temporal</i>	<i>Referências</i>
SPL4SMGP.00 7 SMAP L4	Global 3-hourly 9-km Surface and Root Zone Soil Moisture - includes surface soil moisture (0-5 cm vertical average), root-zone soil moisture (0-100 cm vertical average), and additional research products (not validated), including surface meteorological forcing variables, soil temperature, evapotranspiration, and net radiation.	9km x 9km	N:85.044, S: -85044, E 180, W:- 180	WGS 84 / NSIDC EASE- Grid 2.0 GlobalEPSG:69 33	3 horas	31 de março de 2015 até o presente	Reichle, et al, 2022.
SPL3SMP_E.0 05 SMAP L3	Radiometer Global Daily 9 km Soil Moisture - provides a daily composite of global land surface conditions retrieved by the Soil Moisture Active Passive (SMAP) L-Band radiometer. The daily data here were collected from the descending (local solar time of 6 am) and ascending (local solar time of 6 pm) passes.	9km x 9km	N:90, S: - 85.044, E: 180, W:- 180	WGS 84 / NSIDC EASE- Grid 2.0 NorthEPSG:693 1 WGS 84 / NSIDC EASE- Grid 2.0 GlobalEPSG:69 33	1 dia	31 de março de 2015 até o presente	O'Neill et al, 2021; Entekhabi et al., 2014 and Chan, S. K. et al, 2016.

SPL3SMP_E.0 06 SMAP L3	Radiometer Global Daily 9 km Soil Moisture - provides a daily composite of global land surface conditions retrieved by the Soil Moisture Active Passive (SMAP) L-Band radiometer. The daily data here were collected from the descending (local solar time of 6 am) and ascending (local solar time of 6 pm) passes.	9km x 9km	N:90, S: -85.044, E: 180, W:-181	WGS 84 / NSIDC EASE-Grid 2.0 NorthEPSG:6931 WGS 84 / NSIDC EASE-Grid 2.0 GlobalEPSG:6933	2 dias	31 de março de 2015 até o presente	O'Neill et al, 2021; Entekhabi et al., 2014 and Chan, S. K. et al, 2016.
Reprocessed GLDAS-2.0	Global Land Data Assimilation System. GLDAS-2.0 is forced entirely with the Princeton meteorological forcing input data and provides a temporally consistent series from 1948 through 2014.	0.25°x0.25°	-180.0,-60.0,180.0,90.0	(179.5 W, 59.5 S) for the 1.0° x 1.0° data (179.875 W, 59.875 S) for the 0.25° x 0.25° data	3 horas, diária e mensal	01/01/1984 até 31/12/2014	Rodell et al, 2004.
GLDAS-2.1	Global Land Data Assimilation System.	0.25°x0.25°	-180.0,-60.0,180.0,90.0	(179.5 W, 59.5 S) for the 1.0° x 1.0° data (179.875 W, 59.875 S) for the 0.25° x 0.25° data	3 horas e mensal	01/01/2000 até o presente	Rodell et al, 2004.

	GLDAS-2.2	Global Land Data Assimilation System	0.25°x0.25°	-180.0,-60.0,180.0,90.0	(179.5 W, 59.5 S) for the 1.0° x 1.0° data (179.875 W, 59.875 S) for the 0.25° x 0.25° data	Diária	01/02/2003 até o presente	Li, B. et al. 2019.
<i>Reanálise</i>	ERA5-Land Hourly	ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate reanalysis. Reanalysis combines model data with observations from across the world into a globally complete and consistent dataset using the laws of physics. Reanalysis produces data that goes several decades back in time, providing an accurate description of the climate of the past. This dataset includes all 50 variables as available on CDS.	0.1° x 0.1°; Native resolution is 9 km.	Global	Regular latitude-longitude grid	Horária	Janeiro de 1950 até o presente	Muñoz Sabater, J. et al, 2019.
<i>Reanálise</i>	ERA5-Land Daily Agregated	ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate reanalysis. Reanalysis combines model data with observations from	11132 meters	Global	Regular latitude-longitude grid	Diária	Janeiro de 1950 até o presente	Muñoz Sabater, J. et al, 2019.

		<p>across the world into a globally complete and consistent dataset using the laws of physics. Reanalysis produces data that goes several decades back in time, providing an accurate description of the climate of the past. This dataset includes all 50 variables as available on CDS.</p>						
<i>Reanálise</i>	ERA5-Land Monthly Agregated	<p>ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate reanalysis. Reanalysis combines model data with observations from across the world into a globally complete and consistent dataset using the laws of physics. Reanalysis produces data that goes several decades back in time, providing an accurate description of the climate of the past. This dataset includes all 50 variables as available on CDS.</p>	11132 meters	Global	Regular latitude- longitude grid	Mensal	Janeiro de 1950 até o presente	Muñoz Sabater, J. et al, 2019.
<i>Reanálise</i>	ERA5-Land Monthly	<p>ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate</p>	11132 meters	Global	Regular latitude- longitude grid	Médias mensais das variáveis	Janeiro de 1950 até o presente	Muñoz Sabater, J. et al, 2019.

	Averaged by Hour of Day	reanalysis. Reanalysis combines model data with observations from across the world into a globally complete and consistent dataset using the laws of physics. Reanalysis produces data that goes several decades back in time, providing an accurate description of the climate of the past. This dataset includes all 50 variables as available on CDS.				terrestres ao longo do dia, divididas por hora		
<i>Reanálise</i>	CFSR	Climate Forecast System Reanalysis	0,5° x 0,5°	Global	WGS84 (World Geodetic System 1984)	Horária	13/12/2018 até o presente	Saha et al, 2010.
	FLDAS	Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System	0.1° x 0.1°	-180.0,-60.0,180.0,90.0	WGS84 (World Geodetic System 1984)	1 mês	01/01/1982 até o 31/01/2024	Amy McNally 2018. McNally, A. et al, 2017
<i>Reanálise</i>	MERRA-2 M2T1NXLND	Land Surface Diagnostics V5.12.4	(69375, 55000) meters	Global	Regular latitude-longitude grid	Horária	a partir de 1980	
<i>Reanálise</i>	TerraClimate	Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces	4 km x 4 km	Global	Regular latitude-longitude grid	Mensal	1958-2019	Saha et al, 2010.

<i>Reanálise</i>	CFSV2	NCEP Climate Forecast System Version 2, 6-Hourly Products	22264 meters	Global	Regular latitude- longitude grid	6 horas	1982-2010	Saha et al, 2011
	KBDI	Keetch-Byram Drought Index	4000 meters	Global	Regular latitude- longitude grid	Mensal ou Anual	2007 até o presente	Wataru Takeuchi et al, 2015.
	WWF HydroATLAS Basins Level 03 - 12 (são as subbacias)	BasinATLAS provides a standardized compendium of hydro-environmental attribute information for all watersheds of the world at high spatial resolution.	500 m do equador	Global	World Geodetic System 1984 (GCS_WGS_19 84)	Null	desde 2000	Linke, S. et al, F., 2019.

Tabela 2: Produtos de umidade do solo disponibilizados no GEE (Elaboração da autora).

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho abrange os seis biomas brasileiros: Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. Esses biomas apresentam grande diversidade ecológica, climática e edáfica, o que os torna ideais para a análise comparativa da umidade do solo e de suas variações temporais e espaciais.

De acordo com dados do IBGE (2023), a Amazônia é o maior bioma do Brasil, ocupando aproximadamente 49,5% do território nacional, com uma área total de 4.197.000 km². O Cerrado é o segundo maior, abrangendo cerca de 2.036.448 km², o que representa 23,9% do país. Em seguida, a Caatinga ocupa 844.453 km² (9,9%), enquanto a Mata Atlântica abrange 1.110.182 km², correspondendo a 13% da extensão territorial brasileira. O Pampa, situado predominantemente no estado do Rio Grande do Sul, possui uma área de 176.496 km² (2,1%), e o Pantanal, conhecido por suas áreas úmidas e sazonalmente inundáveis, cobre 150.355 km², o que equivale a 1,8% do território nacional.

O mapa apresentado na Figura 11 ilustra a distribuição espacial dos biomas brasileiros, conforme delineado pelo IBGE. Essa delimitação foi utilizada como base para a extração dos dados de umidade do solo por bioma no GEE, permitindo uma análise direcionada e representativa das diferentes regiões ecológicas do Brasil.

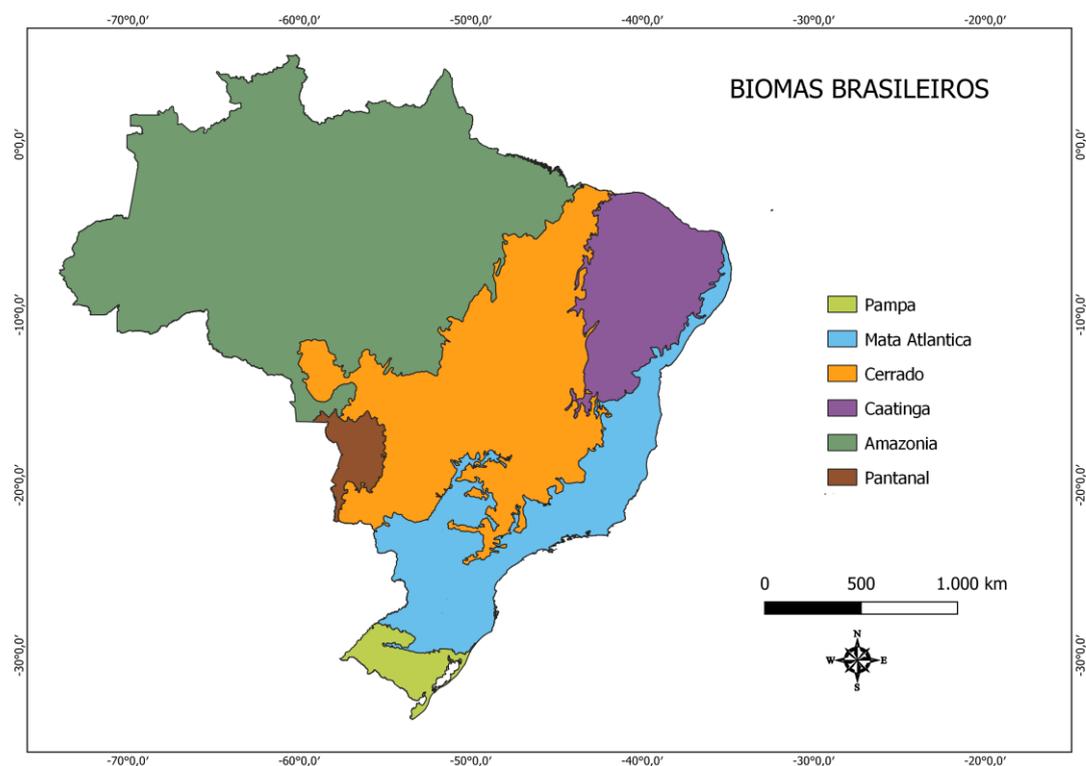


Figura 8: Mapa da área de estudo (Elaboração da autora).

○ **Amazônia**

A Amazônia brasileira abrange uma das maiores formações florestais contínuas do planeta, o que representa cerca de 60% da floresta amazônica sul-americana e aproximadamente 40% do território nacional. Essa área estende-se pelos estados do Acre, Amazonas, Roraima, Pará, Amapá, Rondônia, além de porções do norte de Mato Grosso, Tocantins e do noroeste do Maranhão (Coutinho, 2016).

Embora amplamente tratada como um único bioma, a região apresenta notável diversidade edafoclimática e fitofisionômica, refletindo-se em diferentes padrões de solo, vegetação e regime hídrico. Essa heterogeneidade se reflete diretamente nas condições de umidade do solo, que variam de acordo com o tipo de vegetação, o regime hídrico e as características físicas e químicas dos solos predominantes.

A chamada "Amazônia Legal" constitui uma divisão administrativa instituída pela Lei nº 5.173, de 27 de outubro de 1966, com extensão de cerca de 5,2 milhões de km². Essa delimitação, no entanto, ultrapassa os limites da floresta tropical e inclui áreas de Cerrado

situadas no Planalto Central, não correspondendo, portanto, a uma unidade ecológica homogênea (BRASIL, 1966; Coutinho, 2016).

- Mata Atlântica

Embora o termo “Mata Atlântica” seja amplamente utilizado, ele na verdade abrange um conjunto diverso de biomas que não compartilham uniformidade nas condições climáticas, edáficas e fitofisionômicas, requisitos essenciais para a caracterização de um bioma segundo os critérios internacionais. Essa heterogeneidade é evidenciada pelo contraste entre formações como os manguezais e a floresta com araucárias, que diferem significativamente em termos de salinidade, altitude, tipo de solo, clima e estrutura da vegetação.

É possível identificar quatro principais biomas geralmente agrupados sob o termo "Mata Atlântica". O primeiro é a Floresta Atlântica Densa Sempre-Verde de Encosta, também conhecida como orobioma, que se estende pela cordilheira litorânea desde o Rio Grande do Sul até o Rio Grande do Norte. Essa formação acompanha os chamados "mares de morros" e apresenta três faixas vegetacionais de acordo com a altitude: submontana, montana e altimontana (Coutinho, 2016).

- Cerrado

O Cerrado é um bioma representativo das savanas tropicais estacionais, conforme destacado por Coutinho (2016), sendo considerado o principal exemplo brasileiro desse tipo de formação vegetal. Sua distribuição se concentra no Planalto Central, mas se estende para áreas periféricas, alcançando desde o estado do Paraná, ao sul, até Roraima, ao norte, próximo à fronteira com a Venezuela. No Nordeste, está presente em áreas de tabuleiros, baixos planaltos e chapadas, enquanto, a oeste, avança até a região do Beni, na Bolívia. A porção central do Cerrado ocupa extensas superfícies sedimentares e suavemente aplainadas, com altitudes que variam entre 300 m e 1.700 m, predominando nos interflúvios.

Em termos ecológicos e fitofisionômicos, o Cerrado configura-se como uma savana tropical, com semelhanças às sabanas venezuelanas, africanas e australianas. De modo geral, a vegetação apresenta duas camadas principais: uma herbácea densa e contínua e outra lenhosa, mais esparsa, formada por arbustos e árvores com troncos tortuosos, folhas escleromorfas e presença marcante de súber (cortiça) nos ramos e caules — uma adaptação às recorrentes

queimadas naturais e antrópicas, que exercem forte influência na dinâmica ecológica do bioma (Coutinho, 2016).

- Caatinga

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, localizado majoritariamente na região Nordeste, abrangendo estados como Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Pernambuco e Bahia, estendendo-se também ao norte de Minas Gerais. Caracteriza-se como uma savana tropical estacional adaptada a condições semiáridas (Coutinho, 2016).

O termo "Caatinga", de origem tupi, significa "mata branca" e refere-se à aparência esbranquiçada da vegetação durante os períodos de seca, quando muitas espécies perdem suas folhas. Apresenta uma vegetação xerofítica, decídua e adaptada ao clima quente e seco, diferenciando-se do Cerrado, que é uma savana mais úmida, e das campinaranas amazônicas, que se desenvolvem em ambientes altamente úmidos e arenosos (Coutinho, 2016).

O bioma apresenta uma diversidade de fisionomias vegetais que variam conforme as condições locais de umidade do solo. Essa diversidade vai desde áreas de caatinga arbórea, com maior porte e densidade, até formações mais abertas e rasteiras, incluindo zonas de savana sensu stricto e áreas de arbustivos-escrube (Coutinho, 2016).

O clima predominante é o tropical semiárido, com chuvas que se concentram nos meses de janeiro a maio. Além disso, há forte irregularidade na distribuição das chuvas tanto no tempo quanto no espaço, resultando em longos períodos de seca que podem se estender por mais de seis meses (Coutinho, 2016).

- Pampa

O bioma Pampa, é caracterizado pelos campos Sulinos que ocorrem predominantemente no estado do Rio Grande do Sul, estendendo-se também em manchas descontínuas por Santa Catarina e Paraná, sendo uma formação compartilhada também com os territórios do Uruguai e da Argentina. Essas formações vegetais estão presentes em diferentes altitudes, variando de 100 a 900 metros, o que resulta em variações locais de estrutura e composição (CoutinhO, 2016).

Nas áreas serranas, situadas entre 500 e 900 metros de altitude, os campos são denominados campos serranos, paleáceos ou campos grossos. Já nas regiões de planície e

coxilha do Rio Grande do Sul, com altitudes entre 100 e 200 metros, predominam os chamados pampas ou campos finos, especialmente na Campanha gaúcha (Coutinho, 2016).

O desenvolvimento atual da paisagem deste bioma está fortemente associado à intervenção humana, em especial por meio de práticas como o pastoreio e o uso recorrente do fogo. Tais atividades impedem o avanço natural de formações florestais que poderiam se estabelecer, considerando as condições favoráveis de solo e clima. Dessa forma, os pampas brasileiros são frequentemente interpretados como paisagens culturais ou antrópicas, moldadas ao longo dos últimos séculos por ações agropastoris (Coutinho, 2016).

O clima predominante nessa região é o quente-temperado úmido, com precipitação média anual entre 1.200 e 1.600 mm. As temperaturas variam de 13 °C a 17 °C ao longo do ano, com verões moderadamente quentes e invernos curtos, mas rigorosos, especialmente nas zonas mais elevadas, onde há ocorrência eventual de neve. Uma característica marcante da região são os ventos fortes, conhecidos como minuanos, que atuam principalmente no período frio (Coutinho, 2016).

o Pantanal

O Pantanal configura-se como uma vasta planície situada na Região Centro-Oeste do Brasil, estendendo-se por áreas do oeste de Mato Grosso do Sul e sudoeste de Mato Grosso, com continuidade além das fronteiras nacionais, alcançando setores do norte do Paraguai e do leste da Bolívia. Sua delimitação natural inclui, ao norte, as chapadas dos Parecis e dos Guimarães, e ao sudeste, as serras de Maracaju e da Bodoquena, representando quase 2% do território brasileiro e destacando-se por ser a maior planície inundável contínua do planeta (Coutinho, 2016).

Este bioma é reconhecido como um sistema ambiental complexo, com alta diversidade de paisagens e condições ecológicas em um mesmo espaço geográfico. A variedade de solos, tipos de vegetação e regimes hídricos resulta na formação de múltiplos ambientes, tornando o Pantanal um mosaico ecológico dinâmico. Em razão de sua importância ambiental e sociocultural, é reconhecido como Patrimônio Nacional e integra a Rede Mundial de Reservas da Biosfera (Coutinho, 2016).

O clima predominante na região é o tropical estacional, caracterizado por uma estação chuvosa nos meses de primavera e verão e uma estação seca entre o outono e o inverno. Apesar

de similar ao clima do Planalto Central, o Pantanal apresenta temperaturas mais elevadas, com registros acima de 40 °C em áreas como Cuiabá durante o verão (Coutinho, 2016).

4.2 Obtenção dos dados

Neste trabalho, foram utilizados dados referentes ao período de 2000 a 2024 (tanto para os dados de precipitação quanto para os de umidade), contemplando as quatro bandas de profundidade da umidade do solo, cujas camadas variam a partir da superfície (0 cm).

A escolha da escala temporal de 2000 a 2024 para a análise de precipitação baseou-se na disponibilidade dos dados fornecidos pelo produto IMERG V07 (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*), que está operacional a partir dos anos 2000. A decisão por utilizar este intervalo se justifica tanto pela disponibilidade temporal, quanto pela qualidade e atualização do produto. O IMERG V07 representa uma das versões mais recentes e aprimoradas de dados de precipitação por satélite, oferecendo maior confiabilidade nas estimativas e melhor cobertura espacial e temporal, o que o torna especialmente adequado para estudos regionais em larga escala, como o proposto nesta pesquisa.

A escolha pelo uso do conjunto de dados ERA5-Land foi motivada por sua resolução espacial (~9 km), detalhamento vertical da umidade do solo e cobertura global homogênea, que se alinham diretamente aos objetivos metodológicos deste trabalho. Embora o GLDAS (~27 km) seja amplamente utilizado, o ERA5-Land oferece maior precisão na análise da variabilidade da umidade do solo nos diferentes biomas brasileiros.

Outro critério determinante foi a integração direta do ERA5-Land à plataforma GEE, o que proporciona agilidade na manipulação de dados e maior reprodutibilidade das análises realizadas. Como objetivo do estudo era trabalhar exclusivamente com dados já disponíveis no GEE, a escolha por esse conjunto de reanálise se mostrou metodologicamente mais adequada.

Alternativas como o FLDAS e o MERRA-2 foram avaliadas, mas apresentaram limitações significativas para esta aplicação. O FLDAS, voltado principalmente para monitoramento de secas na África e América Central, possui cobertura limitada na América do Sul, menor detalhamento em profundidade do solo e ausência de integração nativa com o GEE.

Já o MERRA-2, apresenta resolução espacial de ~50 km, profundidade de solo menos padronizada e também não está disponível diretamente no GEE. Além disso, produtos como os

do WWF, apesar de úteis em contextos ecológicos, não são adequados para análise temporal hidrológica e exigem importação manual, o que inviabiliza sua aplicação neste estudo. Dessa forma, o ERA5-Land foi a melhor escolha tanto do ponto de vista científico quanto operacional.

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram obtidos a partir do produto *Monthly Global Precipitation Measurement* (GPM), versão V07, acessível por meio da plataforma GEE. Esse produto fornece estimativas mensais de precipitação com cobertura global, obtidas por meio da fusão de dados de sensores passivos de micro-ondas e radares de bordo de diversos satélites.

No GEE, utilizou-se a coleção NASA/GPM_L3/IMERG_MONTHLY_V07, que apresenta os dados de precipitação média mensal em milímetros por hora (mm/h). Para se obter o valor acumulado mensal (mm/mês), necessário para análises climatológicas, foi aplicada uma conversão que considera o número de dias do mês e as 24 horas do dia.

Após a conversão, calcula-se a média espacial da precipitação dentro do bioma, e o resultado mensal é armazenado em uma tabela contendo o ano, mês e valor médio de precipitação. Ao término do processamento de todos os meses do período selecionado, a tabela final é consolidada e exportada em formato *.csv*, possibilitando posterior análise estatística a partir da criação dos gráficos de área. A Figura 9 ilustra o fluxograma do processo de extração, conversão e exportação dos dados no ambiente GEE.

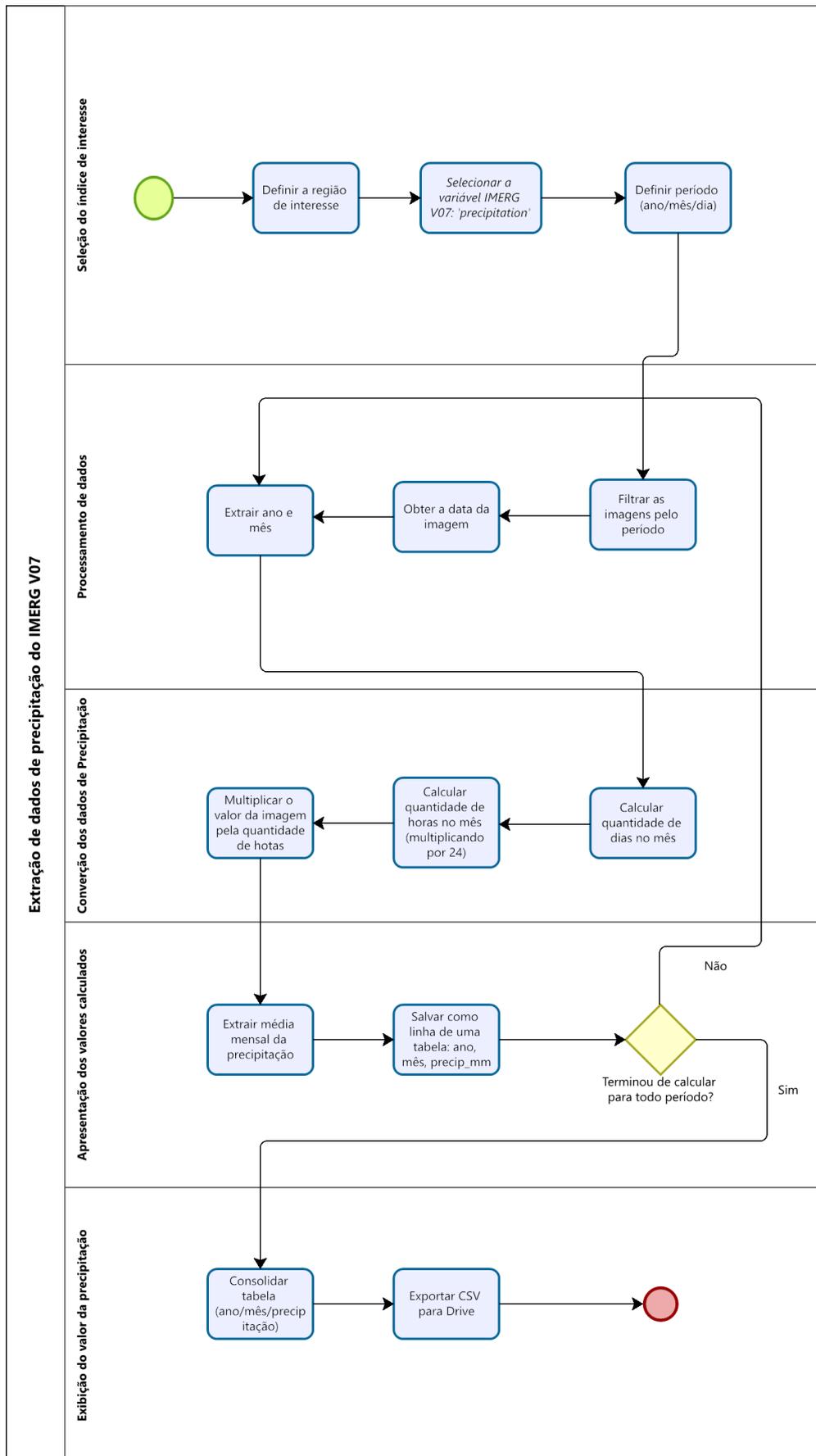


Figura 9: Fluxograma do código para obtenção dos dados de Precipitação (Elaboração da autora).

Após a obtenção dos dados de precipitação por meio dos produtos disponíveis no GEE, optou-se também pela utilização dos dados de umidade do solo do produto *ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis*, disponibilizado pela European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), utilizou-se a coleção ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY_AGGR.

Esse conjunto de dados baseia-se na assimilação de observações e simulações numéricas de modelos climáticos globais, fornecendo informações consistentes com cobertura temporal de 1950 até o presente e resolução mensal. A quantidade de água no solo está relacionada à textura, à profundidade do perfil e à influência do lençol freático, dividindo-se em quatro conforme demonstrado na Tabela 3:

<i>Bandas</i>	<i>Descrição</i>
<i>volumetric_soil_water_layer_1</i>	Volume de água na camada de solo 1 (0 - 7 cm) do Sistema de Previsão Integrada do ECMWF
<i>volumetric_soil_water_layer_2</i>	Volume de água na camada de solo 1 (7 - 28 cm) do Sistema de Previsão Integrada do ECMWF
<i>volumetric_soil_water_layer_3</i>	Volume de água na camada de solo 1 (28 – 100 cm) do Sistema de Previsão Integrada do ECMWF
<i>volumetric_soil_water_layer_4</i>	Volume de água na camada de solo 1 (100 - 289 cm) do Sistema de Previsão Integrada do ECMWF

Tabela 3: Divisão das bandas de acordo com a profundidade (Elaboração da autora).

Os valores da umidade do solo são expressos como uma razão volumétrica entre o volume de água e o volume total do solo, sendo, portanto, uma grandeza adimensional com variação entre 0 e 1 — onde 0 representa ausência de água e 1 indica saturação total do solo.

O sensor do ERA5-Land fornece valores mensais médios da umidade volumétrica para cada pixel. Para extrair os dados utilizados neste estudo, foi desenvolvido um script no GEE (Figura 10), o qual calcula a média espacial mensal da umidade do solo correspondente à área de cada bioma brasileiro.

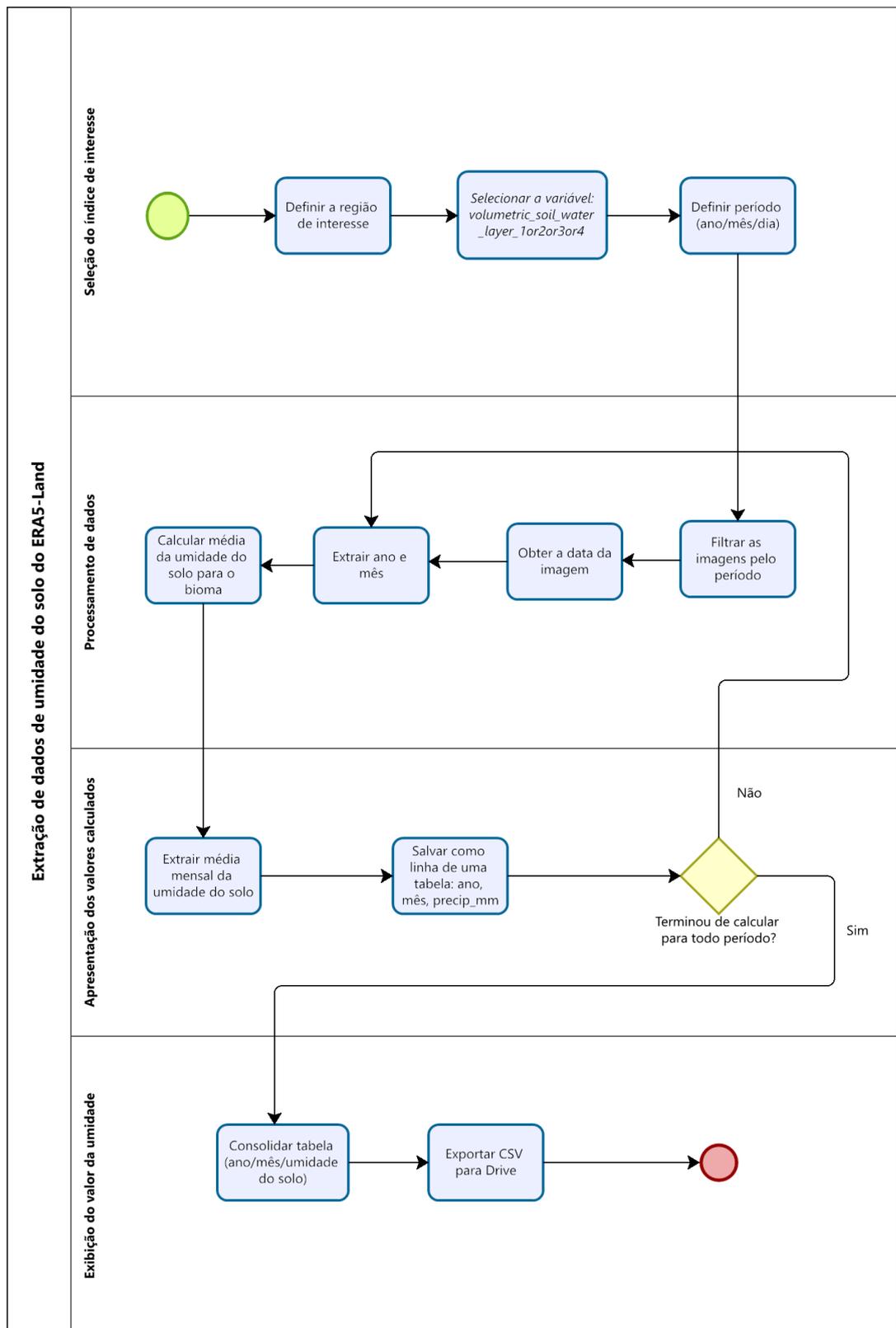


Figura 10: Fluxograma do código para obtenção dos dados de Umidade do Solo (Elaboração da autora).

Na etapa seguinte, os dados foram analisados por meio da construção de gráficos. Para cada bioma foi gerado um gráfico contendo as quatro bandas de profundidade da umidade do

solo, e os valores médios mensais de precipitação. Visando uma melhor visualização das tendências sazonais e da variação temporal, os dados foram agrupados em intervalos quadrimestrais.

A partir da Figura 11, foram analisados os padrões de umidade do solo média nas quatro profundidades (“a”, “b”, “c” e “d”), bem como a precipitação média (“e”) para a série histórica. Foram analisadas as variações de cor (escala de umidade e precipitação), associadas ao espaço geográfico de cada bioma. Por fim, os resultados foram interpretados considerando a sazonalidade e as características ecológicas de cada bioma, relacionando a umidade do solo com a precipitação.

1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A umidade do solo desempenha um papel crucial na definição das características e dinâmicas dos biomas brasileiros. Isso se torna particularmente evidente quando analisamos a sazonalidade da precipitação, que varia significativamente entre os diferentes biomas. A análise conjunta dos dados de precipitação e umidade do solo ao longo da série temporal de 2000 a 2024 revelou padrões distintos entre os biomas brasileiros, refletindo suas características climáticas e ecológicas específicas.

De maneira geral, pode-se observar (Figura 11), que os valores mais baixos de umidade do solo (com variação de 0,01 a 0,15) nas quatro camadas se concentram na porção dos biomas Caatinga e Cerrado, onde as precipitações médias mensais também são mais baixas, variando de 34 a 77 mm.

Ainda na Figura 11, destaca-se a correlação entre a alta pluviosidade (190 a 320 mm) e os valores mais altos de umidade do solo (0,25 a 0,57) no bioma da Amazônia. Um comportamento parecido é observado na Mata Atlântica, na porção mais próxima ao litoral do país, apenas em relação à umidade, pois a precipitação média neste bioma é de 34 a 77 mm. O mesmo ocorre no Pampa, mais ao sul, altos valores de umidade do solo nas quatro camadas, semelhantes aos da Amazônia e Mata Atlântica (0,25 a 0,57) mas com precipitação média de 105 a 170 mm.

No pantanal, localizado no extremo oeste do país, a precipitação média varia de 77 a 105 mm, o que pode justificar os valores de umidade do solo de 0,05 a 0,20, nas quatro camadas (Figura 11). Ademais, os valores obtidos e plotados nos gráficos e tabelas, permitem corroborar a visualização do mapa.

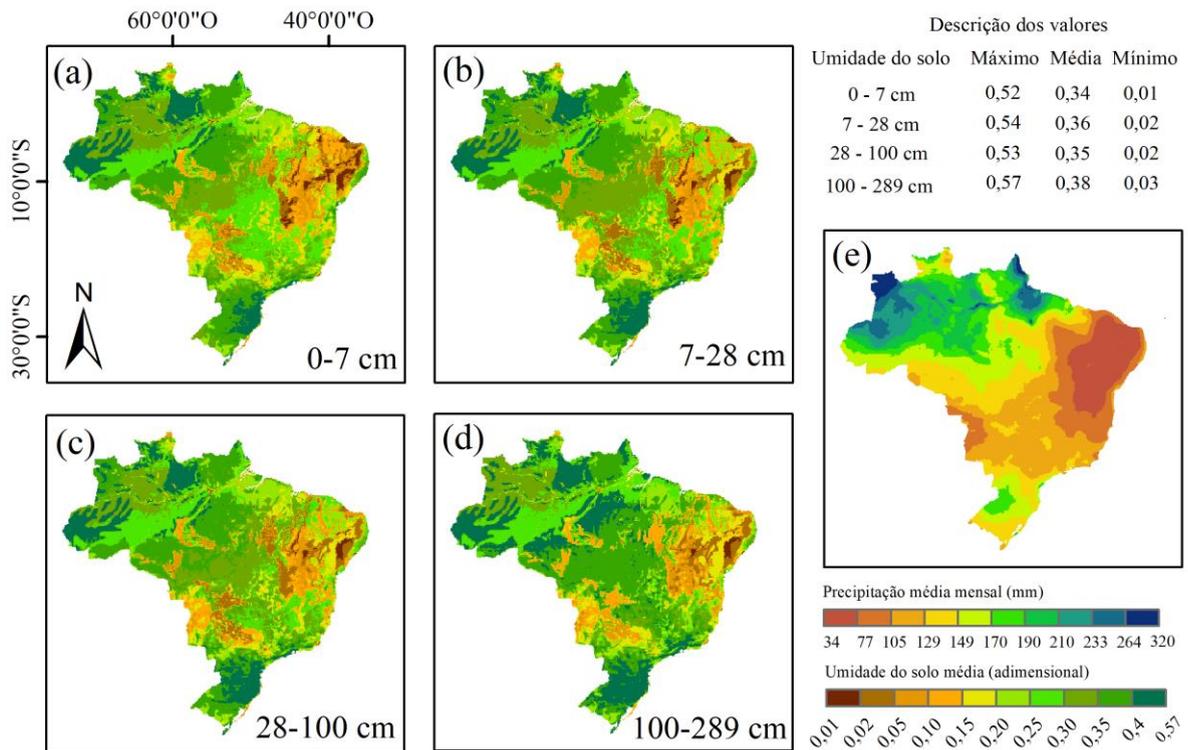


Figura 11: Mapa da série histórica de precipitação (e) e umidade do solo por profundidade (a), (b), (c) e (d) (Elaboração da autora).

O Pantanal, conhecido por seus ciclos de cheias e secas, apresenta uma dinâmica marcante na camada superficial (Tabela 4), onde a umidade média variou entre 0,21 (2024) e 0,29 (2014). Essa camada exhibe alta variabilidade, com coeficiente de variação (CV) entre 25% e 41%, refletindo a sazonalidade típica do bioma. Em contraste, nas camadas mais profundas (Tabela 7), a umidade mostra-se notavelmente estável (CV de 2% a 8%), atuando como um reservatório que atenua as flutuações superficiais. Essa característica é essencial para a resiliência do ecossistema durante períodos de seca.

Os solos pantaneiros são majoritariamente arenoargilosos e apresentam boa fertilidade, favorecida pelos depósitos de sedimentos trazidos pelos rios durante as inundações sazonais. Ainda assim, há considerável diversidade pedológica, incluindo áreas arenosas e não inundáveis localizadas nas cordilheiras, zonas periodicamente alagáveis que se beneficiam da fertilização fluvial, além de solos rasos associados a afloramentos rochosos (COUTINHO, 2016).

A umidade do solo no Pantanal é fortemente influenciada pelo pulso anual de inundação e vazante, fenômeno regulado pelo pequeno desnível da planície, que retarda o escoamento das águas. Durante o período das cheias, entre outubro e março, extensas áreas permanecem submersas ou com o solo saturado de água (COUTINHO, 2016).

Na Figura 12, identifica-se que o regime de chuvas realmente se concentra entre os meses de outubro e março, com precipitações que variam de 100 a 200 mm. Essa sazonalidade impacta diretamente a umidade do solo, sobretudo na camada superficial de 0-7 cm, que varia entre 0,21 e 0,35, acompanhando diretamente os pulsos de chuva.

Já a camada de 7–28 cm (Figura 12) apresenta uma faixa de variação entre 0,25 e 0,34 nos períodos de chuva, assim como a camada de 28-100 cm, demonstrando uma recuperação um pouco mais lenta durante a estação úmida e uma resistência maior à perda de umidade na estação seca, com valores de 0,15 a 0,25.

O ciclo hidrológico favorece uma expressiva diversidade nos ambientes aquáticos do Pantanal, como lagoas (doces ou salobra), rios e corixos, compondo uma paisagem fluida e heterogênea. Em contrapartida, porções elevadas, como as cordilheiras, permanecem secas durante as cheias, evidenciando a variabilidade na disponibilidade hídrica ao longo do território (COUTINHO, 2016).

Enquanto no Cerrado (Figura 13), a variabilidade da precipitação exerce um impacto crítico na umidade do solo. Os períodos chuvosos, concentrados entre outubro e abril, produzem um aumento na umidade do solo, enquanto os meses secos, que vão de junho a agosto, são marcados por uma rápida perda de umidade nas camadas mais superficiais. Com variação mensal de 40 mm nos períodos secos até 300 mm nos meses mais úmidos.

A umidade do solo no Cerrado também está relacionada ao comportamento hidrológico regional. O lençol freático é permanente, embora sua profundidade varie sazonalmente, o que assegura o abastecimento hídrico para espécies vegetais com sistemas radiculares mais profundos. A sazonalidade climática do bioma é acentuada, especialmente no regime de chuvas, com um período úmido entre outubro e abril, e um período seco marcado por baixos índices pluviométricos e umidade relativa do ar em torno de 30%. Em áreas de transição com campos inundáveis ou próximas a matas ciliares, a umidade do solo tende a ser mais elevada devido ao afloramento do lençol freático (COUTINHO, 2016).

No que diz respeito às características edáficas no Cerrado, os solos predominantes são do tipo latossolo, profundos, bem drenados e com coloração variando entre vermelha e vermelho-amarelada. A textura desses solos varia de arenosa a argilosa, sendo quase sempre livre de cascalhos ou pedras. Apesar da boa porosidade e capacidade de infiltração, são solos quimicamente pobres, com alta acidez (pH entre 4,5 e 5,5), presença significativa de alumínio

tóxico e baixos teores de nutrientes essenciais como potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio e fósforo. Por esse motivo, são classificados como solos distróficos ou oligotróficos (COUTINHO, 2016).

Na camada superficial (Tabela 4), as médias de umidade variam de 0,27 a 0,32, com CV moderado (20%-31%), indicando uma resposta equilibrada às variações pluviométricas. À medida que se aprofunda, a umidade torna-se mais homogênea, especialmente acima de 100 cm (Tabela 7) (CV de 4% a 9%), o que sustenta a vegetação de raízes profundas típica desse bioma. A camada intermediária (Figura 13) de 7-28 cm varia entre 0,25 e 0,34, com uma resposta mais amortecida às chuvas e secas. Já a faixa de 28-100 cm se mostra mais estável, entre 0,27 e 0,34, com variações suaves. A profundidade de 100-289 cm mantém valores entre 0,30 e 0,40.

Os estudos mostram que a análise dos padrões climáticos de precipitação nos regimes chuvoso e seco no Cerrado apresentou variabilidade pronunciada, implicando na necessidade de um gerenciamento hídrico eficiente (SANTOS et al., 2010). Essa recomendação sublinha a importância de medidas de conservação e uso sustentável dos recursos hídricos na região, a fim de mitigar os efeitos das secas e promover a resiliência do bioma.

O Pampa, por sua vez, exibe uma dualidade interessante. Enquanto a camada superficial (Tabela 4) apresenta grande variabilidade interanual (CV de 5% a 20%), as camadas acima de 100 cm (Tabela) mostram uma uniformidade notável (CV de 1% a 6%). Essa característica pode estar associada aos solos profundos e à vegetação herbácea, que permitem rápida infiltração da água das chuvas.

Na Figura 14, observa-se que este bioma apresenta um regime hídrico relativamente equilibrado ao longo da série temporal, com valores médios de precipitação mensal variando entre 50 mm e 200 mm, sem padrões de seca prolongada como em outros biomas. Essa regularidade pluviométrica se reflete na umidade do solo, especialmente nas camadas mais profundas.

Possui elevada umidade do solo, garantida pela boa distribuição das chuvas ao longo do ano. Ao contrário das estepes frias e secas de outras regiões do planeta, os pampas sul-brasileiros apresentam solos frios e úmidos, o que torna a permanência de vegetação campestre mais relacionada à influência antrópica do que a restrições ambientais naturais (COUTINHO, 2016).

Ainda na Figura 14, o Pampa apresenta, na camada superficial de 0-7 cm, os valores de umidade do solo oscilam entre 0,25 e 0,40. Nas camadas de 7-28 cm e 28-100 cm, os valores de umidade se mantêm mais estáveis, girando em torno de 0,25 a 0,48. Já na camada mais profunda (100-289 cm), os valores permanecem praticamente constantes ao longo de toda a série, variando pouco em torno de 0,37 a 0,47. Assim, os dados reforçam que o Pampa possui um sistema de armazenamento hídrico eficiente nas camadas subsuperficiais, com relativa estabilidade mesmo diante de pequenas oscilações mensais na precipitação.

No contexto da umidade do solo, a Amazônia abriga diferentes unidades ecológicas que influenciam diretamente as condições hídricas do perfil edáfico. Na Floresta Amazônica Densa Sempre-Verde de Terra Firme, predominam solos profundos, do tipo Latossolo, com textura variando entre arenoargilosa e argilosa. A presença de uma camada orgânica superficial e os elevados índices pluviométricos asseguram uma boa disponibilidade hídrica, mesmo em áreas não sujeitas a inundações (COUTINHO, 2016).

Na Floresta Aberta Sempre-Verde de Terra Firme, também não inundável, os solos tendem a apresentar maior teor de argila, favorecendo a retenção de água, apesar da precipitação anual ligeiramente inferior e da ocorrência de um curto período seco (COUTINHO, 2016).

Nos ambientes ripários, a umidade do solo é condicionada pela dinâmica fluvial. Nas várzeas, os solos aluviais são periodicamente inundados por rios de água branca, recebendo aporte de sedimentos finos que aumentam sua fertilidade e capacidade de retenção de umidade. Já nos igapós, que acompanham rios de água preta, os solos permanecem saturados por mais de sete meses ao ano, apresentando baixa fertilidade e alta concentração de compostos orgânicos, como os fenólicos, resultantes da decomposição da serapilheira submersa (COUTINHO, 2016).

As campinaranas, por sua vez, caracterizam-se por solos extremamente arenosos, altamente lixiviados e com baixa capacidade de retenção de água. Em áreas de relevo deprimido, esses solos podem se apresentar saturados; já nas porções mais elevadas e nas campinas abertas, a ausência de cobertura orgânica superficial intensifica o oligotrofismo e limita a disponibilidade hídrica, especialmente em períodos de estiagem (COUTINHO, 2016).

Assim, a região amazônica configura-se como um mosaico ecológico onde as variações nas condições do solo, no regime de chuvas e na cobertura vegetal influenciam diretamente os padrões de umidade do solo, variável fundamental para a análise desenvolvida neste estudo.

Na Figura 15, o padrão deste bioma (Amazônia) se destaca pela elevada precipitação anual, com médias que variam de 100 mm a 350 mm, mantendo um padrão mais constante em comparação aos outros biomas. Essa constância se traduz em altos níveis de umidade do solo em todas as profundidades. A camada de 0–7 cm mantém-se entre 0,28 e 0,42, com uma ligeira oscilação associada aos picos de precipitação no período de dezembro a maio.

Nas camadas de 7–28 cm e 28–100 cm, os valores variam de 0,32 a 0,44, mantendo uma linha de tendência praticamente estável. Já na faixa de 100–289 cm, os valores ficam entre 0,40 e 0,47. As linhas de tendência são relativamente estáveis, principalmente nas camadas mais profundas, indicando um sistema hidrológico resiliente.

Destaca-se também pelos valores elevados e consistentes de umidade em todas as profundidades. Na superfície (Tabela 4), as médias variam de 0,350 a 0,404, com CV baixo (7%-22%), resultado da combinação entre alta pluviosidade e cobertura florestal que reduz a evaporação. Mesmo nas camadas mais profundas (Tabela 7), a estabilidade persiste (CV <9%), evidenciando um sistema altamente eficiente na retenção de água.

A Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro, revela os desafios de um ambiente semiárido. Com as menores médias de umidade superficial (0,171-0,274, Tabela 4) e alta variabilidade (CV de 13% a 36%), a irregularidade das chuvas torna-se evidente. Contudo, nas camadas profundas (Tabela 7), a umidade apresenta menor oscilação (CV de 1% a 6%), sugerindo que as plantas adaptadas a esse bioma dependem criticamente desses reservatórios subterrâneos durante longos períodos de estiagem.

A irregularidade das chuvas na Caatinga acentua a vulnerabilidade do solo. Neste bioma semiárido, as oscilações na umidade do solo podem ser drásticas, com aumentos rápidos durante a estação chuvosa, seguidos de uma acentuada diminuição da precipitação em tempos de seca. Observa-se que as análises revelam que as mudanças climáticas no semiárido brasileiro podem levar a um aumento significativo nos índices de aridez, enquanto os índices de umidade tendem a atrofiar (SILVA et al., 2018).

Em relação aos solos, a escassez de umidade dificulta os processos de intemperismo químico e formação de solos profundos, predominando a fragmentação física das rochas. Isso resulta em solos pouco desenvolvidos, rasos, pedregosos e com afloramentos rochosos frequentes. Embora possam apresentar fertilidade química relativamente elevada, esses solos possuem baixa capacidade de retenção hídrica, o que limita sua funcionalidade agrícola e

ecológica durante os períodos secos. Em algumas áreas, o processo de evapotranspiração intenso pode concentrar sais na superfície, formando cacimbas salinas (COUTINHO, 2016).

Portanto a umidade do solo na Caatinga é geralmente baixa, especialmente durante o longo período seco, sendo a natureza rasa e pedregosa dos solos contribuintes para a baixa retenção de água. A variação na disponibilidade de água no solo ao longo do bioma é um dos fatores que determina o mosaico de diferentes tipos de vegetação. Contudo, em algumas áreas específicas, como os "brejos" (inselbergs) e nas margens de certos rios onde se formam os carnaubais, a umidade do solo pode ser significativamente maior (COUTINHO, 2016).

Na Figura 16, o comportamento na Caatinga revela baixos índices pluviométricos e a irregularidade das chuvas refletem-se nas oscilações abruptas da umidade na camada de 0-7 cm, que responde rapidamente aos raros eventos pluviométricos. Esse padrão se reflete diretamente na camada de 0-7 cm, cujos valores de umidade variam entre 0,16 e 0,28.

A resposta da superfície é quase imediata às chuvas, mas os valores rapidamente retornam a níveis críticos nos meses secos, como observado em 2012, 2016 e 2021, anos de seca severa, com valores respectivos de 4,37 mm no mês de setembro; 7,48 mm em julho; e 5,54 mm em setembro. A camada de 7-28 cm mantém valores entre 0,22 e 0,30, ainda com forte dependência da precipitação. As faixas de 28-100 cm e 100-289 cm oscilam de 0,26 a 0,31, apresentando linha de tendência negativa, ainda que pouco inclinada. Isso indica que, mesmo em profundidade, não há manutenção eficiente da umidade.

A Mata Atlântica trata-se de uma floresta densa com variações no porte das árvores e na biomassa, sendo maiores nas altitudes mais baixas. Nas altitudes mais elevadas, entre 1.000 e 1.500 metros, pode ocorrer a Floresta Altimontana de Araucária angustifolia. Quanto ao solo, sabe-se que os latossolos predominam nas regiões costeiras quentes e úmidas, caracterizando-se como pobres em nutrientes minerais, ácidos e sujeitos à lixiviação. A umidade do solo varia com a altitude, sendo maior nas áreas montanas devido à constante presença de neblina e alta umidade atmosférica (COUTINHO, 2016).

Outro bioma é a Floresta Atlântica Densa Sempre-Verde de Terras Baixas ou de Planície, também chamada de eubioma. Essa formação se estende pelas planícies e baixos planaltos litorâneos do Rio de Janeiro ao Rio Grande do Norte. É uma floresta pluvial tropical densa, com árvores de 25 a 30 metros de altura e biomassa superior a 200 t/ha. Os solos, majoritariamente latossolos, são ácidos, lixiviados e pobres em nutrientes minerais, com a maior parte do estoque

de nutrientes concentrada na vegetação e na serapilheira. O clima equatorial, quente e úmido ao longo do ano, assegura elevada umidade do solo de forma contínua (COUTINHO, 2016).

Já a Floresta Atlântica Densa Sempre-Verde de Restinga, ou psamo-helobioma, se distribui de forma descontínua ao longo de aproximadamente 5.000 km do litoral brasileiro, excetuando-se o trecho entre o norte do Maranhão e o Amapá. Esse bioma se forma em planícies costeiras dominadas por sedimentos arenosos de origem marinha e eólica. Apesar de os solos serem extremamente arenosos, ácidos e pobres em nutrientes, a declividade suave do terreno e a proximidade do lençol freático fazem com que o solo permaneça encharcado por longos períodos, gerando inclusive condições de anoxia para as raízes. O clima, assim como nos biomas vizinhos, é quente e úmido ao longo de todo o ano (COUTINHO, 2016).

Por fim, a Floresta Atlântica Densa Sempre-Verde de Manguezal, ou halo-helobioma, ocorre de forma descontínua ao longo da costa brasileira, em áreas litorâneas tropicais quentes e úmidas. Essa formação é típica de regiões fluviomarinhas, como foz de rios e estuários protegidos. Sua vegetação é adaptada à dinâmica das marés, com destaque para as raízes aéreas (pneumatóforos), que permitem a respiração das plantas em solos saturados e salinos. Os solos são compostos por materiais finos, lodosos, encharcados e ricos em sal, principalmente cloreto de sódio. A umidade do solo é constantemente elevada, já que as marés, que ocorrem duas vezes por dia, mantêm o solo permanentemente encharcado (COUTINHO, 2016).

Na Figura 17, observa-se que a Mata Atlântica apresenta um regime pluviométrico que varia entre 80 mm e 300 mm por mês, com sazonalidade moderada e tendência de estabilidade ao longo do tempo. A camada de 0-7 cm apresenta umidade entre 0,30 e 0,38, com variações discretas que acompanham a distribuição anual das chuvas. No entanto, camada de 7-28 cm mantém-se entre 0,34 e 0,42, enquanto as faixas de 28-100 cm e 100-289 cm se destacam pela estabilidade, com valores entre 0,37 e 0,45, e linhas de tendência praticamente horizontais

A Mata Atlântica completa a análise com um padrão de umidade estável em todas as profundidades. Na superfície (Tabela 4), as médias variam de 0,354 a 0,394, com CV baixo (4%-11%), reflexo da cobertura florestal que regula a umidade do solo. Nas camadas mais profundas (Tabela 7), a estabilidade é ainda maior (CV de 0,9% a 3,8%), demonstrando a eficiência desse bioma em manter reservas hídricas mesmo em períodos menos chuvosos.

Ao longo da análise, evidenciou-se que as variações sazonais da precipitação têm implicações diretas na umidade do solo, o que, por sua vez, impacta a conservação da

biodiversidade em cada bioma. Os dados indicam que no Pantanal, por exemplo, a saturação rápida do solo durante as cheias contrastava com a resposta lenta nas camadas mais profundas, essencial para a preservação das espécies locais.

Além disso, as especificidades de cada bioma, como a irregularidade das chuvas na Caatinga e a estabilidade da umidade na Amazônia, possuem papéis críticos na resiliência da vegetação durante diferentes estações do ano. A interação entre os padrões de umidade do solo nas camadas profundas e as variações sazonais ofereceu uma visão mais clara sobre como os biomas se adaptam aos desafios impostos pelo clima.

A literatura aponta que a dinâmica atmosférica no Nordeste é controlada por diferentes massas de ar e seus centros de ação. A atuação do Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul e da Zona de Convergência Intertropical são fundamentais para a variação das chuvas na região (ZANELLA, 2014). Isso reafirma a complexidade dos fatores que influenciam a umidade do solo.

As mudanças climáticas previstas trazem desafios significativos para os padrões de umidade do solo. O aumento da aridez em diversas regiões pode comprometer a capacidade de suporte dos ecossistemas, exigindo um gerenciamento hídrico que se adapte a essas novas realidades. Por exemplo, na região semiárida nordestina, apesar das políticas públicas, como a construção de açudes e a perfuração de poços, a escassez de água ainda persiste, devido a fatores climáticos e geológicos que influenciam negativamente a disponibilidade hídrica (ZANELLA, 2014). Essa afirmação reflete a necessidade urgente de estratégias que contemplem as características locais e a variabilidade climática.

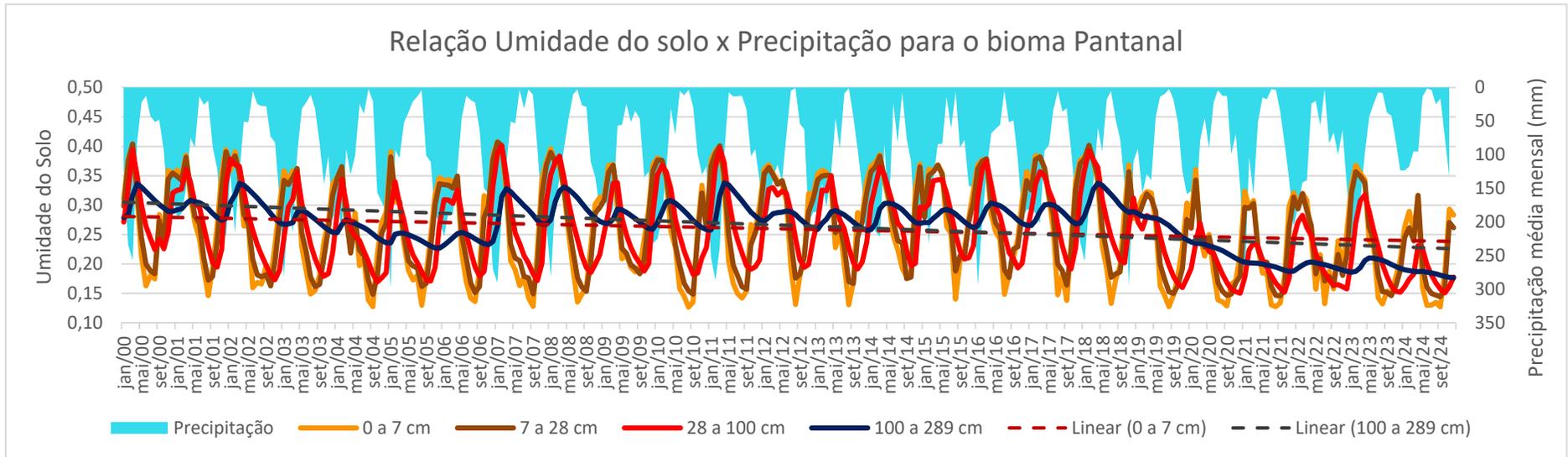


Figura 12: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Pantanal (Elaboração da Autora).

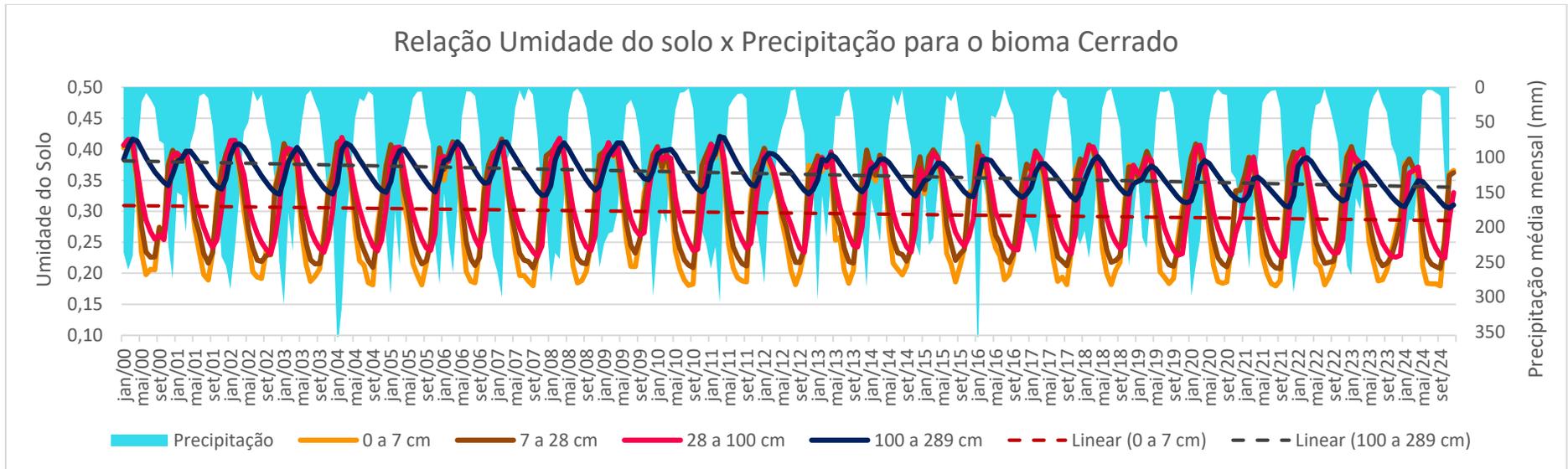


Figura 13: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Cerrado (Elaboração da Autora).

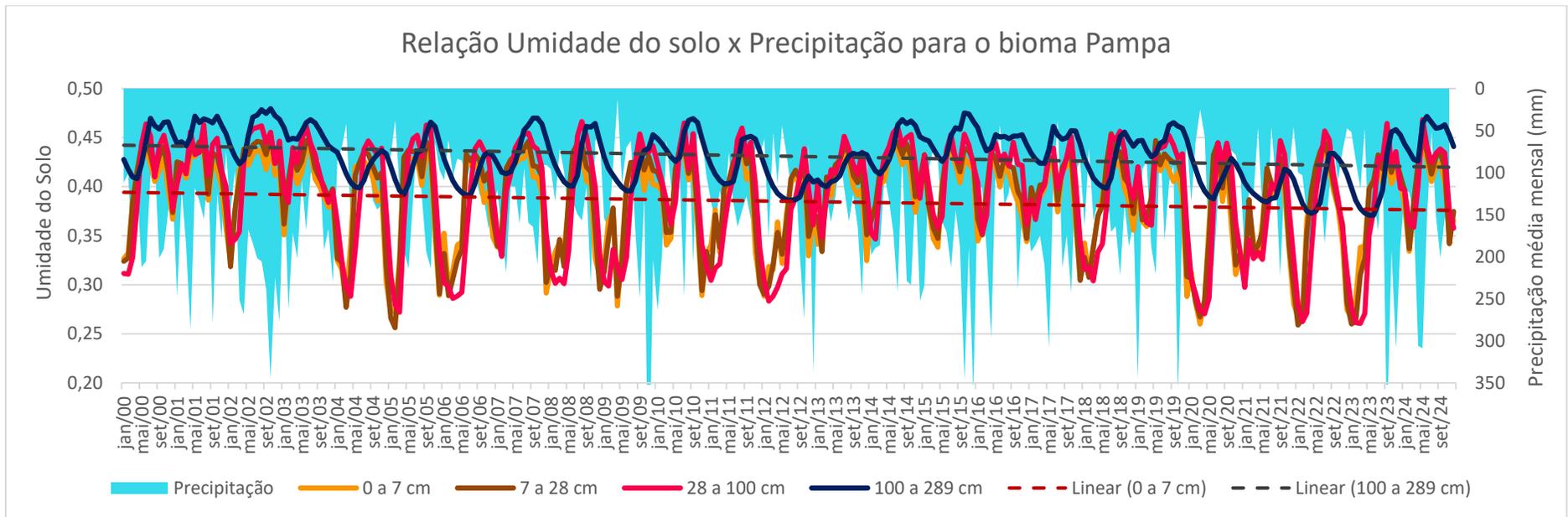


Figura 14: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Pampa (Elaboração da Autora).

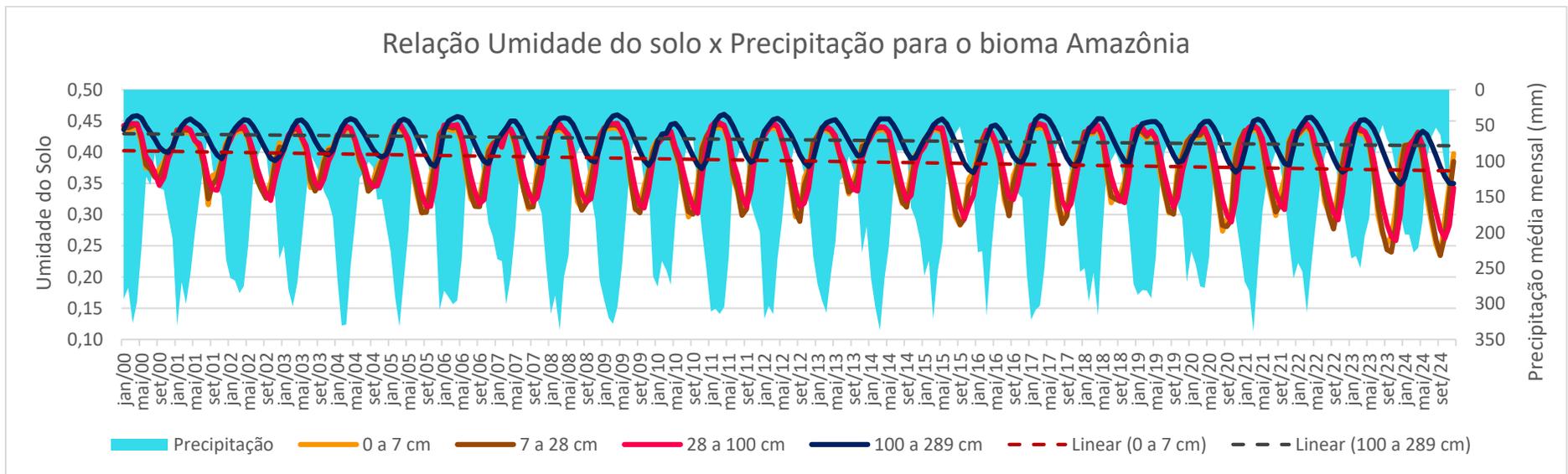


Figura 15: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Amazônia (Elaboração da Autora).

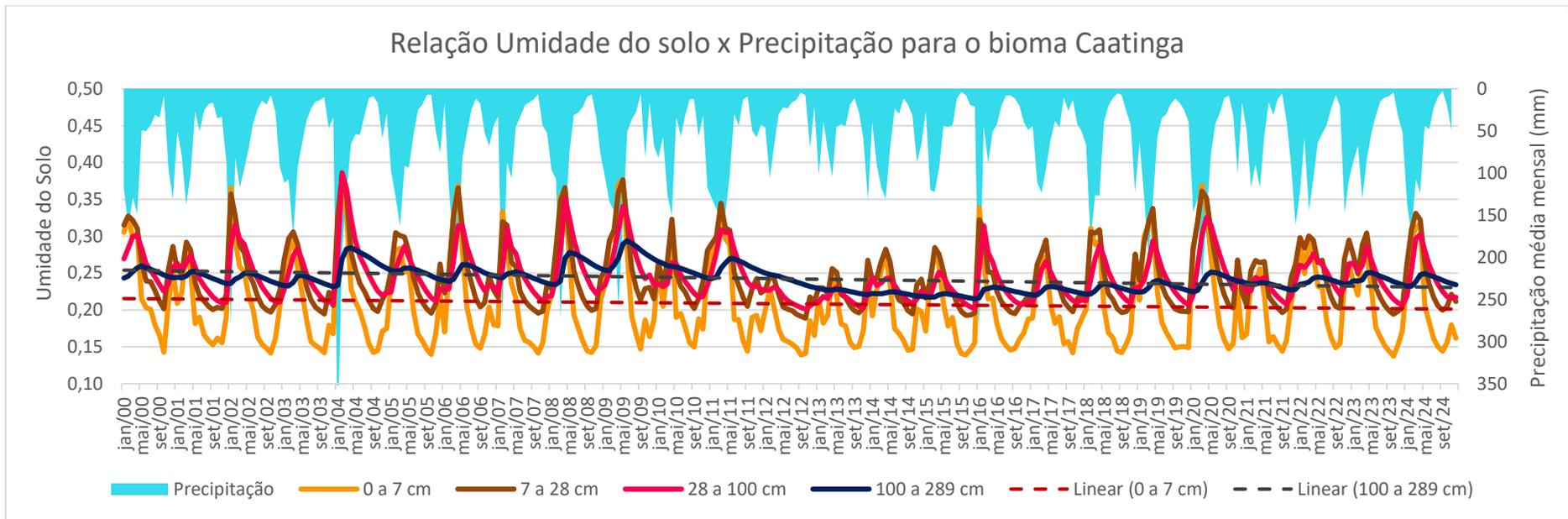


Figura 16: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Caatinga (Elaboração da Autora).

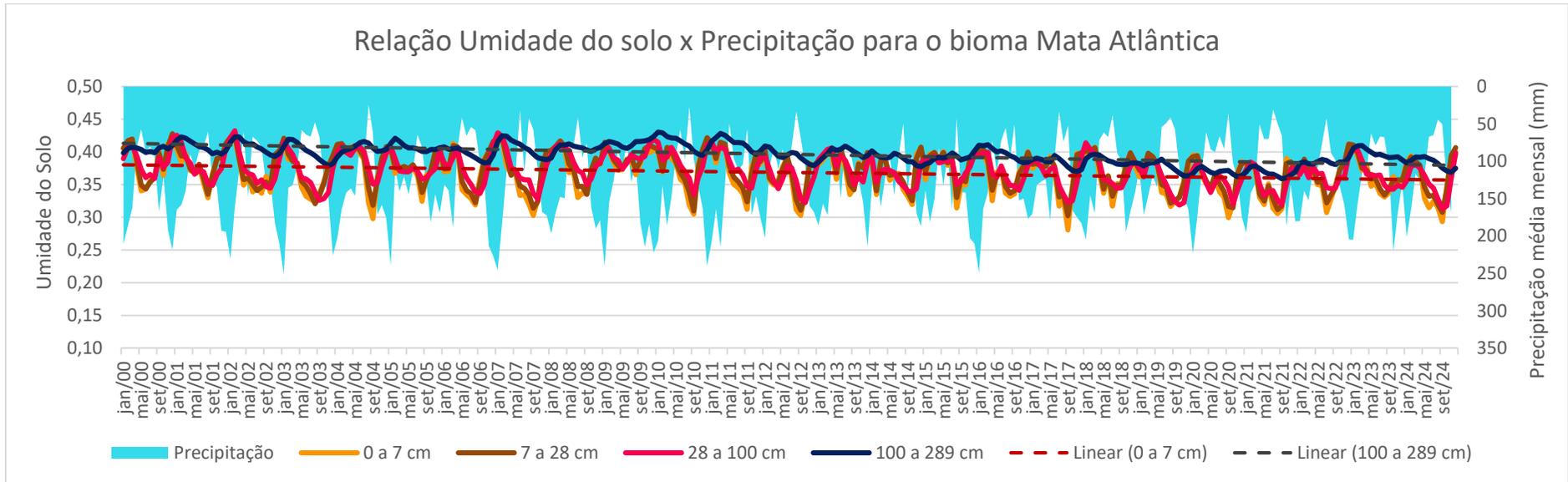


Figura 17: Relação da Umidade do Solo com a Precipitação – Bioma Mata Atlântica (Elaboração da Autora).

		0 a 7 cm																								
Bioma	Ano/ Estatísticas	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Pantanal	Mínimo	0,16	0,15	0,16	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,19	0,13	0,14	0,13	0,13	0,18	0,14	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,13
	Máximo	0,40	0,39	0,39	0,36	0,36	0,35	0,38	0,41	0,40	0,37	0,38	0,40	0,37	0,36	0,39	0,37	0,38	0,38	0,40	0,32	0,41	0,32	0,37	0,37	0,32
	Média	0,28	0,29	0,25	0,26	0,25	0,24	0,27	0,26	0,27	0,27	0,25	0,26	0,29	0,28	0,29	0,28	0,28	0,29	0,28	0,23	0,27	0,23	0,26	0,24	0,21
	Desvio Padrão	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,09	0,11	0,09	0,07	0,09	0,10	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08	0,10	0,08	0,08	0,09	0,08
	CV (%)	30,14	28,73	32,85	31,63	29,77	30,43	33,73	40,99	34,75	26,86	37,52	37,57	28,77	28,70	27,49	25,34	28,26	32,31	33,31	33,01	38,32	34,87	32,56	38,36	35,44
Cerrado	Mínimo	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,21	0,18	0,19	0,18	0,18	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18
	Máximo	0,41	0,40	0,41	0,41	0,41	0,40	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,42	0,40	0,40	0,39	0,40	0,41	0,39	0,40	0,39	0,41	0,39	0,40	0,40	0,38
	Média	0,31	0,31	0,29	0,30	0,30	0,29	0,31	0,28	0,30	0,33	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,29	0,30	0,29	0,30	0,28	0,28
	Desvio Padrão	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
	CV (%)	28,26	25,62	28,51	28,37	29,28	28,96	28,25	31,20	30,47	22,80	30,69	30,39	26,65	26,49	26,67	25,63	26,22	29,22	28,51	27,72	29,14	30,39	29,98	27,47	31,80
Amazônia	Mínimo	0,36	0,32	0,33	0,34	0,34	0,30	0,32	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,33	0,32	0,28	0,30	0,29	0,32	0,30	0,32	0,30	0,31	0,25	0,23
	Máximo	0,44	0,43	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	0,43	0,43
	Média	0,40	0,40	0,39	0,40	0,40	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,39	0,37	0,39	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,36	0,35
	Desvio Padrão	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,07	0,07
	CV (%)	7,25	9,22	9,94	8,05	8,30	13,38	12,08	11,41	12,31	12,84	12,71	12,81	13,51	8,75	11,19	15,23	10,72	14,55	11,83	12,36	11,20	12,89	12,47	20,49	19,84
Pampa	Mínimo	0,33	0,36	0,32	0,35	0,28	0,27	0,30	0,29	0,31	0,28	0,29	0,30	0,29	0,32	0,37	0,34	0,34	0,31	0,31	0,29	0,34	0,28	0,31	0,27	0,33
	Máximo	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,43	0,44	0,43	0,43	0,43	0,44	0,42	0,43	0,44	0,44	0,43	0,42	0,45	0,44	0,43	0,42	0,43	0,44	0,44
	Média	0,40	0,41	0,41	0,40	0,37	0,38	0,37	0,40	0,37	0,38	0,38	0,38	0,36	0,39	0,41	0,40	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,36	0,38	0,38	0,40
	Desvio Padrão	0,04	0,02	0,03	0,02	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,03
	CV (%)	9,43	5,63	8,06	6,08	14,37	16,20	12,33	11,32	13,13	12,34	12,16	11,73	12,14	8,78	6,05	8,06	7,75	8,67	10,90	10,40	9,26	11,64	12,02	14,90	8,68
Caaíngá	Mínimo	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14
	Máximo	0,33	0,29	0,37	0,30	0,37	0,28	0,37	0,33	0,35	0,38	0,31	0,34	0,23	0,25	0,28	0,28	0,34	0,27	0,31	0,32	0,33	0,26	0,35	0,28	0,32
	Média	0,23	0,19	0,21	0,20	0,22	0,21	0,22	0,20	0,22	0,24	0,21	0,23	0,17	0,19	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,22	0,20	0,21
	Desvio Padrão	0,06	0,04	0,07	0,06	0,08	0,05	0,07	0,06	0,08	0,08	0,05	0,07	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,06	0,07	0,06	0,04	0,07	0,05	0,07
	CV (%)	26,40	21,72	32,15	27,44	36,12	26,29	32,99	29,82	34,27	33,39	23,49	29,23	16,18	18,04	21,53	25,37	29,40	22,09	30,16	32,92	29,10	21,50	32,10	26,41	31,50
Mata Atlântica	Mínimo	0,34	0,33	0,34	0,32	0,30	0,32	0,32	0,30	0,33	0,37	0,31	0,31	0,30	0,33	0,32	0,31	0,33	0,28	0,32	0,32	0,32	0,31	0,33	0,33	0,29
	Máximo	0,42	0,41	0,42	0,42	0,41	0,40	0,41	0,42	0,41	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41	0,40	0,42	0,39	0,41	0,41	0,40
	Média	0,38	0,38	0,37	0,36	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,37	0,37	0,36	0,38	0,37	0,38	0,37	0,36	0,37	0,36	0,37	0,35	0,37	0,36	0,35
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04
	CV (%)	8,09	5,90	8,49	8,45	9,64	5,46	9,02	10,55	7,75	3,83	9,28	8,63	8,34	5,71	7,78	7,16	7,58	10,05	7,49	7,59	10,03	9,15	7,41	6,66	10,65

Tabela 4: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 0 a 7 cm (Elaboração da Autora).

		7 a 28 cm																									
Bioma	Ano/ Estatísticas	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Pantanal	Mínimo	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,18	0,15	0,16	0,18	0,17	0,18	0,19	0,18	0,16	0,18	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	
	Máximo	0,40	0,39	0,38	0,36	0,37	0,34	0,38	0,41	0,39	0,37	0,38	0,40	0,36	0,35	0,38	0,37	0,38	0,38	0,40	0,32	0,41	0,31	0,37	0,36	0,32	
	Média	0,29	0,29	0,25	0,26	0,25	0,24	0,27	0,26	0,27	0,27	0,26	0,27	0,29	0,28	0,29	0,29	0,28	0,29	0,29	0,28	0,23	0,28	0,23	0,26	0,24	0,21
	Desvio Padrão	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,08	0,09	0,09	0,07	0,08	0,09	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07	0,10	0,07	0,08	0,08	0,06	
	CV (%)	26,72	26,28	31,61	28,81	27,05	26,34	29,77	35,67	31,79	26,63	32,19	33,08	23,85	24,47	25,06	21,41	24,92	27,23	29,44	28,73	34,92	28,87	28,85	35,55	28,19	
Cerrado	Mínimo	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
	Máximo	0,41	0,40	0,41	0,41	0,42	0,40	0,41	0,42	0,41	0,41	0,40	0,42	0,40	0,40	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,40	0,42	0,40	0,41	0,40	0,38	
	Média	0,32	0,32	0,30	0,31	0,31	0,30	0,32	0,30	0,32	0,33	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,30	0,32	0,30	0,31	0,29	0,30	
	Desvio Padrão	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	
	CV (%)	24,38	21,82	24,96	24,86	24,73	24,45	23,81	26,39	25,60	19,92	25,43	25,17	22,36	22,22	22,60	21,09	22,36	23,74	24,01	23,27	24,42	25,28	25,16	24,39	24,99	
Amazônia	Mínimo	0,36	0,33	0,33	0,34	0,34	0,30	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,29	0,34	0,31	0,28	0,30	0,29	0,32	0,30	0,31	0,30	0,31	0,24	0,23	
	Máximo	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	
	Média	0,40	0,40	0,39	0,40	0,40	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,40	0,39	0,37	0,39	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,35	0,35	
	Desvio Padrão	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,08	0,07	
	CV (%)	8,35	9,64	10,85	8,56	9,10	14,04	12,89	11,93	13,04	13,86	13,08	13,45	13,95	9,47	12,01	15,88	10,84	15,20	12,61	12,88	11,81	13,59	13,21	22,41	20,08	
Pampa	Mínimo	0,32	0,38	0,32	0,36	0,28	0,26	0,29	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,29	0,33	0,36	0,35	0,35	0,30	0,31	0,31	0,34	0,30	0,30	0,26	0,34	
	Máximo	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,45	0,43	0,45	0,44	0,44	0,44	0,45	0,42	0,44	0,45	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45	
	Média	0,40	0,42	0,42	0,41	0,38	0,39	0,37	0,40	0,37	0,38	0,39	0,39	0,36	0,40	0,42	0,41	0,40	0,40	0,39	0,40	0,40	0,37	0,38	0,38	0,40	
	Desvio Padrão	0,04	0,02	0,04	0,02	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,04	
	CV (%)	10,56	4,95	9,05	5,84	15,54	17,75	14,53	11,31	14,92	13,68	12,12	13,00	12,77	8,34	6,51	8,06	7,70	9,11	11,95	9,67	9,68	12,26	13,99	17,85	9,20	
Caaatinga	Mínimo	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,19	0,20	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20	
	Máximo	0,33	0,29	0,36	0,31	0,38	0,30	0,37	0,32	0,37	0,38	0,32	0,34	0,25	0,27	0,28	0,28	0,32	0,30	0,31	0,34	0,32	0,27	0,37	0,30	0,33	
	Média	0,27	0,23	0,25	0,24	0,26	0,25	0,26	0,24	0,26	0,27	0,25	0,26	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,23	0,26	0,24	0,25	
	Desvio Padrão	0,04	0,03	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06	0,06	0,03	0,05	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	
	CV (%)	16,77	13,61	21,15	16,99	24,29	17,17	20,13	18,36	21,99	20,60	13,89	17,33	9,01	10,30	11,72	14,03	18,30	12,93	18,70	20,48	17,69	12,50	20,19	16,50	19,46	
Mata Atlântica	Mínimo	0,34	0,34	0,34	0,32	0,32	0,34	0,32	0,31	0,34	0,37	0,31	0,32	0,31	0,34	0,33	0,33	0,34	0,30	0,33	0,32	0,32	0,31	0,34	0,33	0,31	
	Máximo	0,43	0,41	0,43	0,42	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41	0,40	0,42	0,38	0,41	0,41	0,41	
	Média	0,39	0,38	0,37	0,37	0,39	0,38	0,37	0,37	0,38	0,39	0,38	0,38	0,38	0,36	0,38	0,37	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,35	0,38	0,36	0,36	
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	
	CV (%)	7,76	5,85	8,35	8,32	7,91	4,95	8,48	9,86	7,05	3,68	8,56	7,69	7,51	5,27	6,79	5,81	6,69	8,35	6,92	7,40	9,69	8,26	6,71	6,14	9,21	

Tabela 5: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 7 a 28 cm (Elaboração da Autora).

		28 a 100 cm																								
Bioma	Ano/ Estatísticas	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Pantanal	Mínimo	0,22	0,19	0,17	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,19	0,19	0,20	0,16	0,18	0,15	0,19	0,15	0,15
	Máximo	0,39	0,36	0,38	0,36	0,34	0,34	0,33	0,40	0,38	0,34	0,37	0,40	0,33	0,35	0,36	0,34	0,37	0,36	0,39	0,28	0,40	0,24	0,35	0,32	0,23
	Média	0,28	0,28	0,26	0,25	0,24	0,23	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,29	0,28	0,27	0,28	0,29	0,23	0,28	0,20	0,25	0,23	0,18
	Desvio Padrão	0,05	0,06	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,07	0,05	0,07	0,08	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,07	0,05	0,08	0,03	0,06	0,06	0,03
	CV (%)	18,91	20,52	29,55	22,93	23,75	24,05	21,40	30,07	27,43	20,19	26,70	27,75	19,47	20,15	19,76	18,88	22,97	20,39	23,17	21,39	29,28	16,15	21,77	26,57	14,21
Cerrado	Mínimo	0,25	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,24	0,26	0,24	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,23	0,22
	Máximo	0,42	0,40	0,41	0,40	0,42	0,40	0,41	0,41	0,42	0,41	0,40	0,42	0,39	0,40	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40	0,39	0,41	0,39	0,41	0,39	0,37
	Média	0,33	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,33	0,30	0,32	0,34	0,32	0,33	0,31	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0,30	0,33	0,30	0,32	0,30
	Desvio Padrão	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,05
	CV (%)	19,99	18,40	21,74	21,22	20,35	20,95	18,56	21,75	20,85	16,96	19,93	20,34	17,94	18,07	18,37	17,45	18,58	19,06	19,81	19,74	18,63	19,06	20,41	22,56	17,88
Amazônia	Mínimo	0,35	0,34	0,32	0,34	0,35	0,31	0,32	0,32	0,32	0,31	0,30	0,31	0,31	0,34	0,32	0,29	0,32	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31	0,32	0,26	0,26
	Máximo	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,44	0,44	0,45	0,45	0,43	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,43	0,45	0,44	0,44	0,43	0,44	0,45	0,45	0,43
	Média	0,40	0,40	0,39	0,40	0,39	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,40	0,39	0,40	0,39	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39	0,36	0,35
	Desvio Padrão	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,07	0,06
	CV (%)	9,00	9,70	10,92	8,51	9,10	13,36	12,50	11,03	12,43	13,56	12,01	12,47	12,69	9,33	11,16	14,89	9,89	13,86	12,34	11,98	10,93	12,86	12,53	20,38	17,09
Pampa	Mínimo	0,31	0,40	0,34	0,38	0,29	0,27	0,29	0,33	0,30	0,30	0,32	0,30	0,28	0,35	0,35	0,36	0,35	0,34	0,30	0,36	0,29	0,30	0,30	0,26	0,36
	Máximo	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,46	0,45	0,45	0,47	0,45	0,46	0,46	0,44	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45	0,47	0,46	0,47
	Média	0,40	0,43	0,42	0,42	0,38	0,39	0,36	0,41	0,37	0,37	0,40	0,39	0,35	0,41	0,42	0,42	0,41	0,41	0,38	0,41	0,39	0,37	0,38	0,36	0,41
	Desvio Padrão	0,06	0,02	0,05	0,03	0,06	0,07	0,07	0,04	0,07	0,06	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,04
	CV (%)	14,33	4,89	11,13	6,45	15,51	18,14	18,45	10,79	17,45	16,88	11,10	14,49	15,43	6,56	9,36	8,01	7,86	7,72	15,18	8,80	13,14	12,88	17,19	21,27	9,25
Caatinga	Mínimo	0,23	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,23	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,22	0,21	0,22	
	Máximo	0,30	0,27	0,31	0,28	0,39	0,29	0,31	0,31	0,35	0,34	0,26	0,31	0,23	0,23	0,24	0,25	0,31	0,27	0,29	0,29	0,31	0,24	0,35	0,29	0,30
	Média	0,26	0,24	0,25	0,24	0,28	0,25	0,26	0,25	0,26	0,27	0,24	0,26	0,21	0,22	0,23	0,22	0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,23	0,27	0,24	0,25
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,04	0,03	0,06	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,04	0,03	0,03
	CV (%)	9,68	9,85	14,52	10,72	19,90	10,05	12,79	12,74	16,04	13,25	6,45	11,51	4,99	4,13	5,57	7,14	13,95	8,23	10,73	11,11	12,78	5,52	15,33	10,61	12,78
Mata Atlântica	Mínimo	0,36	0,35	0,34	0,33	0,35	0,36	0,34	0,33	0,35	0,37	0,33	0,34	0,32	0,35	0,34	0,35	0,34	0,32	0,34	0,32	0,34	0,32	0,35	0,34	0,31
	Máximo	0,42	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40	0,41	0,43	0,41	0,42	0,41	0,42	0,39	0,41	0,39	0,40	0,40	0,39	0,41	0,39	0,43	0,38	0,41	0,40	0,40
	Média	0,39	0,38	0,38	0,36	0,39	0,37	0,37	0,37	0,38	0,40	0,38	0,38	0,36	0,38	0,36	0,38	0,37	0,36	0,37	0,36	0,38	0,35	0,38	0,37	0,36
	Desvio Padrão	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
	CV (%)	5,19	6,35	7,75	8,26	5,31	3,31	6,59	8,52	5,31	3,19	6,19	6,04	5,88	4,88	4,80	3,89	5,50	6,77	6,41	7,06	9,02	6,46	4,88	5,95	7,35

Tabela 6: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 28 a 100 cm (Elaboração da Autora).

		100 a 289cm																									
Bioma	Ano/ Estatísticas	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Pantanal	Mínimo	0,28	0,27	0,27	0,25	0,24	0,23	0,23	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,24	0,23	0,19	0,27	0,19	0,18	
	Máximo	0,34	0,31	0,34	0,29	0,27	0,25	0,25	0,33	0,33	0,29	0,31	0,34	0,29	0,29	0,30	0,29	0,30	0,30	0,34	0,29	0,33	0,20	0,33	0,21	0,19	
	Média	0,31	0,29	0,31	0,27	0,26	0,24	0,24	0,29	0,30	0,28	0,28	0,30	0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,31	0,27	0,26	0,20	0,29	0,20	0,18	
	Desvio Padrão	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	
	CV (%)	6,19	3,99	7,03	4,47	4,93	4,15	3,16	7,82	6,98	4,23	6,15	8,66	3,62	4,40	5,55	3,75	4,97	4,81	6,24	5,62	12,61	2,93	7,83	4,34	2,54	
Cerrado	Mínimo	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,35	0,33	0,33	0,35	0,33	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,31	0,35	0,31	0,33	0,31	0,31	
	Máximo	0,42	0,40	0,41	0,40	0,41	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,42	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,37	0,41	0,35	0,41	0,38	0,35	
	Média	0,38	0,37	0,37	0,36	0,37	0,37	0,38	0,37	0,37	0,38	0,37	0,38	0,36	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35	0,36	0,35	0,38	0,33	0,37	0,35	0,32	
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	
	CV (%)	6,87	5,90	8,16	7,08	7,89	6,58	5,98	8,62	7,41	5,64	7,20	7,34	6,69	5,84	5,92	5,42	6,49	5,93	5,78	5,92	6,61	4,99	7,03	6,76	4,96	
Amazônia	Mínimo	0,40	0,39	0,39	0,40	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,35	0,35	
	Máximo	0,46	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,46	0,45	0,45	0,46	0,45	0,46	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,46	0,45	0,45	0,46	0,45	0,46	0,45	0,43	
	Média	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,42	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,39	
	Desvio Padrão	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	
	CV (%)	5,20	5,28	5,79	4,93	5,43	6,87	6,71	5,74	6,28	7,13	6,12	6,59	6,76	4,92	5,75	7,37	5,59	7,35	5,96	6,08	5,84	6,29	6,44	9,23	8,01	
Pampa	Mínimo	0,41	0,44	0,42	0,44	0,40	0,39	0,39	0,41	0,40	0,40	0,43	0,40	0,39	0,40	0,41	0,43	0,44	0,42	0,40	0,43	0,39	0,38	0,40	0,37	0,43	
	Máximo	0,47	0,47	0,48	0,47	0,44	0,47	0,43	0,47	0,46	0,45	0,47	0,45	0,42	0,43	0,47	0,48	0,46	0,46	0,46	0,47	0,43	0,42	0,46	0,46	0,47	
	Média	0,44	0,46	0,46	0,45	0,42	0,43	0,41	0,44	0,43	0,42	0,45	0,43	0,40	0,42	0,44	0,45	0,45	0,44	0,42	0,45	0,41	0,40	0,43	0,40	0,45	
	Desvio Padrão	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	
	CV (%)	5,32	2,45	4,69	2,13	3,41	6,20	4,06	5,18	5,71	4,50	3,47	4,71	2,97	3,39	4,99	3,69	1,46	3,02	4,96	2,59	3,96	2,94	5,76	8,66	3,48	
Caatinga	Mínimo	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,24	0,23	0,25	0,23	0,23	
	Máximo	0,26	0,25	0,25	0,25	0,28	0,26	0,26	0,25	0,28	0,29	0,27	0,27	0,25	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,26	0,24	0,28	0,25	0,25	
	Média	0,25	0,24	0,24	0,24	0,27	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26	0,24	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,25	0,23	0,27	0,24	0,24	
	Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	
	CV (%)	2,28	2,12	2,26	2,36	5,33	2,11	3,23	2,03	6,11	5,09	2,83	3,46	2,73	1,26	0,90	0,99	1,91	1,84	2,15	2,37	2,65	1,53	3,26	2,24	2,57	
Mata Atlântica	Mínimo	0,40	0,40	0,39	0,38	0,39	0,40	0,38	0,39	0,39	0,41	0,39	0,40	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,38	0,36	0,38	0,36	0,40	0,39	0,37	
	Máximo	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,41	0,42	0,41	0,42	0,43	0,43	0,41	0,41	0,40	0,40	0,41	0,39	0,40	0,39	0,42	0,38	0,42	0,41	0,39	
	Média	0,40	0,41	0,41	0,40	0,41	0,41	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,38	0,39	0,38	0,40	0,37	0,41	0,40	0,38	
	Desvio Padrão	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01
	CV (%)	0,97	2,28	2,50	3,62	1,67	1,54	2,23	3,26	1,43	1,21	2,99	2,44	2,37	1,84	1,88	1,43	2,54	2,13	1,54	2,27	3,79	1,72	1,15	1,87	2,25	

Tabela 7: Análise estatística anual da umidade do solo – Profundidade: 100 a 289 cm (Elaboração da Autora).

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo destacam a umidade do solo como um indicador-chave da saúde ambiental e da vulnerabilidade climática dos biomas brasileiros. A análise da variabilidade da umidade em diferentes profundidades e sua relação com a precipitação ao longo da série temporal de 2000 a 2024 permitiu compreender as dinâmicas hidrológicas específicas de cada bioma, evidenciando como fatores climáticos e ambientais influenciam a distribuição e retenção hídrica no solo.

A investigação revelou que os biomas Amazônia e Mata Atlântica mantêm níveis elevados e estáveis de umidade do solo em todas as profundidades, resultado da elevada pluviosidade, que favorece a infiltração e o armazenamento hídrico. Em contraste, os biomas Cerrado e Caatinga apresentaram maior sensibilidade às oscilações climáticas, com reduções significativas da umidade nas camadas superficiais durante os períodos secos e tendências decrescentes nas séries temporais, especialmente nas regiões mais impactadas por eventos de seca severa. No Pantanal, observou-se uma redução progressiva da umidade em profundidade após 2020, possivelmente associada à intensificação dos incêndios florestais. O Pampa, por sua vez, apresentou estabilidade hídrica, com valores mais altos nas camadas profundas, o que pode estar relacionado à textura argilosa dos solos.

De forma geral, os resultados evidenciam que as camadas superficiais do solo respondem de forma mais imediata à variabilidade da precipitação, enquanto as camadas mais profundas apresentam maior inércia hídrica, funcionando como reservatórios subterrâneos com resposta mais lenta, mas de fundamental importância para a manutenção da umidade em períodos de estiagem.

A análise da umidade do solo nos diferentes biomas brasileiros revelou padrões complexos e regionais, influenciados pelas particularidades climáticas e ambientais de cada área. A interação entre a umidade do solo e outras variáveis climáticas, como a precipitação, destaca a importância desses fatores na dinâmica hídrica dos biomas, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e detalhado. Identificar tendências e variações temporais nesses dados é crucial para aprimorar a precisão dos modelos climáticos e antecipar mudanças nos ecossistemas.

Como direções para futuras pesquisas, recomenda-se a inclusão de parâmetros como: evapotranspiração, temperatura do solo e características da cobertura vegetal. A integração desses dados permitirá uma compreensão mais holística da interação entre a umidade do solo e os fatores climáticos, facilitando a identificação de áreas suscetíveis à desertificação e à perda de biodiversidade.

A implementação de estratégias eficazes de gestão hídrica se torna essencial não apenas para mitigar os efeitos da sazonalidade, mas também para preservar a integridade dos ecossistemas brasileiros. Portanto, a inter-relação entre a sazonalidade, precipitação e umidade do solo não é apenas uma questão acadêmica; ela tem implicações práticas que podem guiar políticas de conservação e gestão de recursos naturais. Esse enfoque multidimensional contribuirá para o desenvolvimento de políticas de manejo sustentável mais eficazes e estratégias de conservação adaptadas às necessidades específicas de cada bioma, promovendo uma gestão ambiental mais consciente e proativa.

REFERÊNCIAS

AGPTEA – Associação Gaúcha Pró-Escolas Famílias Agrícolas. **Solos e meio ambiente: física do solo.** [S.l.]: AGPTEA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/SOLOS%20E%20MEIO%20AMBIENTE%20FISICA%20DO%20SOLO.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2025.

ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, v. 23, n. 5, p. 711–728, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMY MCNALLY NASA/GSFC/HSL (2018), FLDAS Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS), Greenbelt, MD, USA, **Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**, Accessed: [Data Access Date], doi:10.5067/5NHC22T9375G.

ANJOS, L. H., FERNANDES, M. R., PEREIRA, M. G.; FRANZMEIER, D. P. **Landscape and pedogenesis of an Oxisol-Inceptisol-Ultisolsequence in Southeastern Brazil.** Soil Science Society of America Journal, 62(6), 1651-1658.1998. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060024x>.

ALBERGEL, CLÉMENT et al. **ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations: which one performs better?** Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 6, p. 3515–3532, 28 jun. 2018.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S.. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações.** [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

BARBOSA JR, A. R.. **Elementos de Hidrologia Aplicada.** 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2022. v. 1. 434p

BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. DOS S.. **Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, n. 2, p. 125–134, jun. 2009.

BRADY, N.C; WEIL, R.R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos.** 3ª ed. Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. Editora Bookman, Porto Alegre, RS, 2013. 685 p.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; Do Brasil, CPRM-Serviço Geológico. Mapeamento de três decênios da precipitação pluviométrica total e sazonal do bioma Pantanal.

CATALDI, M. et al. **Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul extratropical na região da confluência Brasil-Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do Sul e Sudeste do Brasil.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 513–524, 2010. DOI: 10.1590/s0102-77862010000400010.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos Solos e suas aplicações fundamentos.** 7. ed. Rio De Janeiro: Grupo Gen - Ltc, 2015. v. 1p. 234

CHAN, S. K., et al. 2016. "**Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product**" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (8): 4994-5007
10.1109/tgrs.2016.2561938.

CONSTANTZ, J.; MURPHY, F. The temperature dependence of ponded infiltration under isothermal conditions. *Journal of Hydrology*, v. 122, p. 119–128, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90175-H](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90175-H).

CORREIA, F. W. S., MANZI, A. O., CÂNDIDO, L. A., SANTOS, R. M. N. DOS, ; PAULIQUEVIS, T. (2007). **Balço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal.** *Ciência e Cultura*, 59(3), 104-113. ISSN 0009-6725 (versão impressa), ISSN 2317-6660 (versão on-line). São Paulo.

COUTINHO, Leopoldo Magno, 1934-2016. *Biomias brasileiros / Leopoldo Magno Coutinho.* - São Paulo : Oficina de Textos, 2016.

DULEY, F.; DOMINGO, C. **Effect of water temperature on rate of infiltration.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 8, p. 129–131, 1944. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1944.036159950008000C0023X>.

DENG Y, WANG S, BAI X, et al. **Comparison of soil moisture products from microwave remote sensing, land model, and reanalysis using global ground observations.** *Hydrological Processes*. 2020; 34: 836–851. <https://doi.org/10.1002/hyp.13636>.

ENTEKHABI et al., 2014 D. ENTEKHABI, S. YUEH, P. O'NEILL, K. KELLOGG et al. **SMAP Handbook - Soil Moisture Active Passive: Mapping Soil Moisture and Freeze/thaw From Space.** SMAP Project, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA (2014) SMAP Handbook.

ESPINOZA, J. C. et al. **Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought.** *Geophysical Research Letters*, v. 38, L13406, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011GL047862>.

FONTES, M. P. F. **Intemperismo de rochas e minerais**. In: KER, J.C.; SHAEFER, C.E.G.R.; VIDALTORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 171-205.

F. GILBERTO, et al. **Clima da Amazônia**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/fish.html>>. Acesso em: 27 ago. 2024.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina De Textos, 2007.

GONÇALVES, HC, et al. **Hydrological Cycle**. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 71, no. 1 suppl 1, Abr. 2011, pp. 241–253, <https://doi.org/10.1590/s1519-69842011000200003>.

GREGORY, J.; DUKES, M.; JONES, P.; MILLER, G. **Effect of urban soil compaction on infiltration rate**. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 61, p. 117–124, 2006. Disponível em: <https://abe.ufl.edu/faculty/mdukes/pdf/stormwater/Gregor-et-%20al-JSWC-compaction-article.pdf>.

GRUPPELLI, J. L.; MARQUES, J. R. Q.; DINIZ, G. B. **Relação entre as anomalias de TSM e qualidade potencial da uva na região Nordeste do Rio Grande do Sul**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 171–175, 2008. DOI: 10.1590/s0100-29452008000100031.

HSU, J.; HUANG, W.-R.; LIU, P.-Y. Performance assessment of GPM-based near-real-time satellite products in depicting diurnal precipitation variation over Taiwan. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, p. 100957, dez. 2021.

JUNIOR, Jurandir Zullo et al. Multi-resolução em sensoriamento remoto para monitoramento agrícola: uma revisão. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 7, pág. 1517-1529, 2014.

KAISER, D. R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n.3, p. 649-658, mai./jun. 2010.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Formação e evolução do solo (Pedogênese)**. In: KER, J.C.; SHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa-MG, 2012, p.207-302.

KENDALL, M.G. **Rank correlation methods**. 4. ed. London: Hodder Arnold, 1976.

- KLEIN, V. A. **Física do Solo** – Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.
- LAL P, SHEKHAR A, GHARUN M, DAS NN. **Spatiotemporal evolution of global long-term patterns of soil moisture**. *Sci Total Environ*. 2023 Apr 1;867:161470. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161470. Epub 2023 Jan 10. PMID: 36634770.
- LANGER, Max; ELTINK, Estevan; BITTENCOURT, Jonathas; ROHN, Rosemarie. **Serra do Cadeado, PR: uma janela paleobiológica para o Permiano continental sul-americano**. 2009.
- LI, B., M. RODELL, S. KUMAR, H. BEAUDOING, A. GETIRANA, B. F. ZAITCHIK, et al. (2019) **Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges**. *Water Resources Research*, 55, 7564-7586.
- LIMA JR., Joaquim Alves de et al. O uso do sensoriamento remoto na biodiversidade e conservação. *Peer Review*, v. 6, n. 7, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2235>.
- LINKE, S., LEHNER, B., OUELLET DALLAIRE, C., ARIWI, J., GRILL, G., ANAND, M., BEAMES, P., BURCHARD-LEVINE, V., MAXWELL, S., MOIDU, H., TAN, F., THIEME, M. (2019). **Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution**. *Scientific Data* 6: 283. DOI:10.1038/s41597-019-0300-6.
- LOS, S. O., POLLACK, N. H., PARRIS, M. T., COLLATZ, G. J., TUCKER, C. J., SELLERS, P. J., ... AND DAZLICH, D. A. (2000). **A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data**. *Journal of Hydrometeorology*, 1(2), 183-199.
- MADHAVI, G. N. et al. Estimation and Validation Study of Soil Moisture Using GPS-IR Technique Over a Tropical Region: Variability of SM With Rainfall and Energy Fluxes. **IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 15, p. 42–49, 1 jan. 2022.
- MAIER, É. L. B.; SIMÕES, J. C. **Preliminary analysis of the spatial patterns of precipitation distribution over South America**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 5, n. 1, 2012. DOI: [10.5935/1984-2295.20120086](https://doi.org/10.5935/1984-2295.20120086).
- MAHTO, S. S.; MISHRA, V. Does ERA-5 Outperform Other Reanalysis Products for Hydrologic Applications in India? **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 16, p. 9423–9441, 27 ago. 2019.

MCNALLY, A., ARSENAULT, K., KUMAR, S., SHUKLA, S., PETERSON, P., WANG, S., FUNK, C., PETERS-LIDARD, C.D., ; VERDIN, J. P. (2017). **A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications**. *Scientific Data*, 4, 170012.

MILIONE, G. M. et al. **Influence Of Soil Texture, Climate And Vegetation Cover On Secondary Soil Salinization In Pampas Plains, South America**. *CERNE*, v. 26, n. 2, p. 212–221, abr. 2020.

MOHANTY, B. P. et al. **Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science**. *Vadose Zone Journal*, v. 16, n. 1, p. vzj2016.10.0105, jan. 2017.

Monitoramento dos Focos Ativos por Estado, Região ou Bioma - Programa Queimadas - INPE. Disponível em: <https://terrabilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/>.

MUÑOZ SABATER, J., (2019): **ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (<date of access>), doi:10.24381/cds.68d2bb30.

NASA. IMERG V07 Technical Documentation. Greenbelt, MD: NASA Global Precipitation Measurement Mission, 2023. Disponível em: <https://gpm.nasa.gov/resources/documents/imerg-v07-technical-documentation>.

NELSON et al. **Hidrologia básica**. [s.l.] Editora Blucher, 1976.

NEPAL, B. et al. Assessment of GPM-Era Satellite Products' (IMERG and GSMaP) Ability to Detect Precipitation Extremes over Mountainous Country Nepal. *Atmosphere*, v. 12, n. 2, p. 254, 15 fev. 2021.

NERY, Flávio Henrique. **Análise multifractal da variabilidade espacial pluviométrica no estado de Minas Gerais**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/IGCM-AYFHR3>.

O'NEILL, P. E., S. CHAN, E. G. NJOKU, T. JACKSON, R. BINDLISH, J. CHAUBELL, AND A. COLLIANDER. 2021. **SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 5**. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Archive Center. doi:10.5067/4DQ54OUIJ9DL.

PAMPUCH, L. A.; FERRAZ, S. E. T. **Investigação do Modo Sul em dados de precipitação no período de 1982 a 2006 no estado do Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 107–116, 2012. DOI: 10.1590/s0102-77862012000100011.

PATRIOTA, Eduardo. **Influência do Índice de Anomalia de Chuvas na vegetação da bacia hidrográfica do rio Pajeú por Sensoriamento Remoto.** *Revista de Geografia*, Recife, v. 41, p. 169-182, 2024. DOI: 10.51359/2238-6211.2024.258619

PAVINATO, P.S.; RESOLEM, C.A. **Disponibilidade de nutrientes no solo – decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 911-920. 2008.

PENEREIRO, J. C. et al.. **Distribuições de Tendências Sazonais de Temperatura Média e Precipitação nos Biomas Brasileiros.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 1, p. 97–113, jan. 2018, doi:10.1590/0102-7786331012.

PEREIRA, Marcos Gervasio; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; JUNIOR, Carlos Roberto de Carvalho; PINTO, Luiz Alberto da Silva; SILVA NETO, Eduardo de Sá e; FONTANA, Ademir. **Formação e caracterização de solos.** [S. l.]: Atena Editora, 2019. DOI: 10.22533/at.ed.3481923091

P. LAL, G. SINGH, N. N. DAS, A. COLLIANDER and D. ENTEKHABI, "Assessment of ERA5-Land Volumetric Soil Water Layer Product Using *In Situ* and SMAP Soil Moisture Observations," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, 2022, Art no. 2508305, doi: 10.1109/LGRS.2022.3223985.

PINTO, NELSON L. DE SOUSA, et al. *Hidrologia Básica*. 1º ed., Editora Blucher, 1 Jan. 1976, p. 304.

REBOITA, M. S. et al. **Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. doi: 10.1590/s0102-77862010000200004.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas, Editora Manole Ltda. São Paulo, 1987, 188p.

REICHLER, R.H., G. DE LANNOY, R.D. KOSTER, W.T. CROW, J.S. KIMBALL, Q. LIU, AND M. BECHTOLD. 2022. **SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7.** [Indicate subset used]. Boulder,

Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi:10.5067/LWJ6TF5SZRG3.

RIBEIRO, F. L. et al. **The impact of drought on soil moisture trends across Brazilian biomes**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, p. 879–892, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-21-879-2021>.

RODELL, M., P.R. HOUSER, U. JAMBOR, J. GOTTSCHALCK, K. MITCHELL, C.-J. MENG, K. ARSENAULT, B. COSGROVE, J. RADAKOVICH, M. BOSILOVICH, J.K. ENTIN, J.P. WALKER, D. LOHMANN, AND D. TOLL, **The Global Land Data Assimilation System**, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3), 381-394,2004.

ROZANTE, J. R.; ROZANTE, G. IMERG V07B and V06B: A Comparative Study of Precipitation Estimates Across South America with a Detailed Evaluation of Brazilian Rainfall Patterns. **Remote Sensing**, v. 16, n. 24, p. 4722, 17 dez. 2024.

SAHA, S., et al. 2011, updated daily. **NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products**. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>.

SAHA, S., S. MOORTHI, H. PAN, X. WU, J. WANG, and Coauthors, 2010: **The NCEP Climate Forecast System Reanalysis**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015-1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1.

SANTOS, R. M. et al. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade de solo. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, nov./dez. 2006.

SANTOS, D. N. dos; SILVA, V. P. R. da; SOUSA, F. A. S. de; SILVA, R. A. e. **Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 492–500, 2010. DOI: 10.1590/s1415-43662010000500006.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F.. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.

SCHÖNAUER, M., ÅGREN, A. M., KATZENSTEINER, K., HARTSCH, F., ARP, P., DROLLINGER, S., AND JAEGER, D.: **Soil moisture modeling with ERA5-Land retrievals**,

topographic indices, and *in situ* measurements and its use for predicting ruts, Hydrol. Earth Syst. Sci., 28, 2617–2633, <https://doi.org/10.5194/hess-28-2617-2024>, 2024.

Situação atual - Programa Queimadas - INPE. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/situacao_atual/>. Acesso em: 20 ago. 2024.

SILVA, M. J. da et al. **Gradientes pluviométricos do estado de Pernambuco: uma análise do litoral ao semiárido.** *Revista Engenharia na Agricultura - Reveng*, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 240–249, 2018. DOI: 10.13083/reveng.v26i3.889.

SOIL MOISTURE. **Soil Moisture.** Disponível em: <https://climate.esa.int/en/projects/soil-moisture/#_about-tab>. Acesso em: 20 ago. 2024.

SOUZA, C. F. et al. **Calibração de sensores para determinação da umidade do solo: estudo de caso com TDR e FDR em um Latossolo Vermelho distrófico.** São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2016.

SOUZA, E. B. de et al. **Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental.** *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 21, 2017. DOI: 10.5380/abclima.v21i0.41232.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar.** Edgard Blücher Ltda./EDUSP, São Paulo, SP, 2003, 400 p

STUDART, T. M. C. (2004) – **Precipitação.** Disponível em: http://www.deha.ufc.br/ticianahidrologia/apostila/capitulo5_hidrologia_2002.pdf.

TEIXEIRA, D. D. B. et al. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TUCCI, CARLOS E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 943p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos v. 4)

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. . **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 1975. v. 1. 200p .

WATARU TAKEUCHI, SONI DARMAWAN, RIZATUS SHOFIYATI, MAI VAN KHIEM, KYAW SAN OO, UDAY PIMPLE AND SUTHY HENG, 2015. **Near-real time meteorological drought monitoring and early warning system for croplands in Asia.** 36th Asian conference on remote sensing (ACRS): Manila, Philippines, Oct. 20, 2015.

XU, L. et al. In-situ and triple-collocation based evaluations of eight global root zone soil moisture products. **Remote Sensing of Environment**, v. 254, p. 112248–112248, 1 mar. 2021.

YANG, J.; ZHANG, G. **Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff**. *Journal of Soils and Sediments*, v. 11, p. 751–761, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S11368-011-0356-1>.