



C A P Í T U L O 3

CLIMA COMO FATOR NA FORMAÇÃO DO SOLO: CENÁRIOS CLIMÁTICOS E PEDOGÊNESE NO MARANHÃO

Gunter de Azevedo Reschke

Pesquisador NUGEO - Universidade Estadual do Maranhão

Carlos Wendell Soares Dias

Pesquisador NUGEO - Universidade Estadual do Maranhão

Carlos Marcio de Aquino Eloi

Pesquisador NUGEO - Universidade Estadual do Maranhão

Márcio Roberto Bezerra Fialho

Pesquisador NUGEO - Universidade Estadual do Maranhão

Claudia Klose Parise

Professora - Universidade Federal do Maranhão

Wesley Lima Barbosa

Analista de inovação - Empresa Maranhense de Administração Portuária

Mayara Rodrigues Nascimento

Doutoranda - Universidade Federal do Maranhão

1. INTRODUÇÃO

A formação dos solos resulta da interação entre fatores naturais e antrópicos ao longo do tempo, sejam eles climáticos, geológicos, biológicos ou químicos. No contexto da pedogênese, o clima é considerado um dos fatores mais determinantes, pois influencia diretamente a intensidade do intemperismo, a dinâmica da matéria orgânica e os processos de translocação e acúmulo de minerais nos perfis de solo (Jenny, 1941; Kämpf & Curi, 2012).

No Maranhão, essa complexidade se reflete em uma diversidade edáfica notável, influenciada por uma combinação de elementos como relevo, fonte e material de origem, vegetação e, sobretudo, o clima. O estado ocupa uma zona de transição entre os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga, apresentando gradientes de umidade e temperatura que modulam os regimes pluviométricos e os processos

pedogenéticos. A atuação de sistemas atmosféricos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e as Ondas de Leste determina padrões sazonais de precipitação que afetam diretamente a recarga hídrica, o desenvolvimento dos horizontes diagnósticos e a atividade biológica no solo.

Além de seu papel na formação dos solos, o clima também está diretamente associado à sua degradação. Estudos indicam que alterações nos regimes de temperatura e precipitação, como as previstas nos cenários de mudanças climáticas, podem acelerar processos como erosão, salinização, compactação e diminuição no conteúdo de matéria orgânica (Macedo et al., 2021; Ayer et al., 2024). Em regiões onde coexistem solos altamente intemperizados e zonas de fragilidade hídrica crescente, como no Maranhão, essas mudanças podem comprometer seriamente a estabilidade edáfica e a produtividade dos ecossistemas.

Diante desse contexto, torna-se estratégico compreender como os elementos e fatores climáticos modulam a gênese e a dinâmica dos solos maranhenses. Esse entendimento é essencial não apenas para fins acadêmicos e científicos, mas também para subsidiar o planejamento territorial, o manejo e conservação do solo de maneira mais sustentável e a formulação de políticas públicas capazes de mitigar os impactos ambientais. Este capítulo propõe uma análise dos mecanismos climáticos envolvidos na pedogênese do Maranhão, com base em literatura científica recente e dados regionais, contribuindo para uma abordagem integrada entre clima, solo e sustentabilidade.

2. NOTAS PALEOCLIMÁTICAS E IMPLICAÇÕES PARA A FORMAÇÃO DOS SOLOS NO MARANHÃO

Embora este capítulo priorize os efeitos dos elementos climáticos atuais e projetados sobre os solos maranhenses, é importante reconhecer que a história climática da Terra também contribuiu para moldar as paisagens edáficas da região. Durante o período Quaternário, por exemplo, o Brasil tropical foi submetido a fases cíclicas de resfriamento (glaciais) e aquecimento (interglaciais), o que influenciou a vegetação, o intemperismo e as taxas de sedimentação em diversas regiões.

No Maranhão, estudos paleoclimáticos sugerem que, em fases glaciais, climas mais secos e frios favoreceram a instalação de formações abertas, reduzindo a cobertura vegetal e intensificando processos erosivos e de formação de solos menos desenvolvidos, especialmente em áreas de transição ecológica (Ab'Sáber, 1977; Nunes et al., 2012). A seguir, a Tabela 1 resume os principais períodos glaciais e interglaciais e sua relevância para a formação do solo no Brasil.

Tabela 1 – Principais períodos climáticos da Terra e sua relevância para os solos brasileiros.

Período Climático	Período aproximado	Fatores principais	Relevância para o Brasil/Maranhão
Glaciação Huroniana	2,4 – 2,1 bilhões de anos	Redução do metano após evento de oxigenação	Sem influência direta no contexto edáfico atual
Glaciação Criogênica	720 – 635 milhões de anos	Redução dos gases de efeito estufa e variação orbital	Relevância geológica global, sem reflexo edáfico direto
Glaciação Karoo	360 – 260 milhões de anos	Formação do supercontinente Pangeia	Impacto indireto nas formações geológicas antigas da América do Sul
Glaciação do Quaternário	2,58 milhões de anos – presente	Ciclos de Milankovitch e alterações no CO ₂	Influência direta: climas mais secos no Nordeste, erosão acentuada, solos menos desenvolvidos
Períodos Interglaciais	Últimos ~11.700 anos	Aumento do CO ₂ , mudanças orbitais	Expansão da floresta, aumento da umidade e condições mais favoráveis à formação de solos

Fonte: Elaborado com base em Ab'Sáber (1977); Mendonça & Danni Oliveira (2007); Nimer (1989); e Suguio et al. (1985).

Essa tabela permite reconhecer que, mesmo sob condições naturais de variabilidade climática, os ciclos de umidade e seca exerceram papel fundamental na modelagem do ambiente edáfico atual. Em especial, o período Quaternário teve influência significativa na diferenciação dos solos em ambientes tropicais, como no Maranhão.

3. ELEMENTOS CLIMÁTICOS E SEUS EFEITOS NA PEDOGÊNESE DO MARANHÃO

O clima atua como um fator determinante na formação e evolução dos solos, influenciando diretamente os processos de intemperismo físico e químico, na dinâmica da matéria orgânica, na atividade biológica e na translocação de materiais ao longo do perfil de solo. No Maranhão, a heterogeneidade do clima, variando entre equatorial úmido ao norte, tropical no centro-sul e semi-árido no extremo sul, exerce forte controle sobre a pedogênese, sendo um dos fatores que contribui para a diversidade de classes de solos observadas no estado.

a) Temperatura

As elevadas temperaturas do ar em superfície presentes no Maranhão, com médias anuais entre 26 °C e 28 °C (INMET, 2021), aceleram as reações químicas e o intemperismo químico do solo, favorecendo a degradação de minerais primários e a formação de argilas secundárias. Além disso, intensificam a atividade microbiana, promovendo a mineralização da matéria orgânica. Em ambientes quentes e de baixa amplitude térmica, como no Maranhão, os processos de desagregação e alteração mineral tendem a ser mais intensos, originando solos profundos e fortemente intemperizados, como os Latossolos.

b) Radiação Solar

A alta incidência de radiação solar contribui para o aquecimento do solo e para a intensificação da evapotranspiração. Isso pode resultar em maior perda de umidade no perfil de solo, limitando a atividade biológica e a mobilidade dos nutrientes em períodos secos. Por outro lado, a radiação solar favorece a fotossíntese das plantas, o que pode incrementar a adição de matéria orgânica superficial, especialmente em áreas com cobertura vegetal preservada. No Maranhão, a alta incidência de radiação solar ao longo do ano intensifica a evapotranspiração, levando à maior perda da água do solo, especialmente nas regiões mais secas do estado. Contudo, em áreas com vegetação preservada, a radiação solar favorece a fotossíntese, contribuindo para a adição de matéria orgânica e o aumento da fertilidade das camadas superficiais do solo.

c) Evapotranspiração

A evapotranspiração, que compreende a evaporação direta do solo e a transpiração das plantas, exerce influência direta sobre a disponibilidade de água para os processos pedogenéticos. No Maranhão, os valores elevados de evapotranspiração potencial podem limitar o tempo de permanência da água no solo, comprometendo a lixiviação e a formação de horizontes de acumulação. Esse fator é ainda mais crítico em áreas de transição para o semiárido, onde a escassez hídrica se torna um limitante à formação de solos profundos.

d) Umidade

A umidade do solo é um elemento-chave para a pedogênese, pois atua como meio para reações químicas, transporte de solutos e sustentação da atividade biológica. Em regiões com balanço hídrico positivo, predominam solos mais profundos e intemperizados. Já em ambientes sujeitos a déficit hídrico prolongado, é comum encontrar processos de salinização e formação de crostas superficiais que dificultam a infiltração de água e o desenvolvimento radicular.

e) Precipitação

A distribuição espacial e temporal das chuvas no Maranhão varia de forma expressiva, com totais anuais superiores a 2.000 mm na porção norte e inferiores a 1.200 mm no centro-sul. A água das chuvas é fundamental para os processos de eluição e lixiviação, que contribuem para o transporte de partículas sólidas em suspensão (translocação) ao longo do perfil, ou a remoção de nutrientes para o lençol freático (Moraes & Costa, 2009). Regiões com precipitação elevada e bem distribuída favorecem o desenvolvimento de horizontes profundos, intemperizados e que podem apresentar maiores teores de argila, enquanto áreas com déficit hídrico ou chuvas irregulares (como no centro-sul) tendem a formar solos mais rasos e menos desenvolvidos.

Compreender a atuação integrada desses elementos climáticos é fundamental para interpretar a distribuição e as propriedades dos solos no Maranhão. Na próxima seção, serão analisadas como as características climáticas regionais moldam as classes de solo predominantes no estado do Maranhão, com base em estudos e dados locais.

4. O CLIMA DO MARANHÃO E SUAS IMPLICAÇÕES PARA OS SOLOS

O estado do Maranhão apresenta um regime climático predominantemente tropical, caracterizado por temperaturas elevadas durante todo o ano e regimes pluviométricos variáveis entre suas diferentes regiões fisiográficas. Segundo Alvares et al. (2013), o clima no estado pode ser classificado majoritariamente como tropical úmido (Aw), com faixas de clima tropical de monção (Am) na porção noroeste e semiárido (BSh) em áreas do sul do estado. Essa diversidade climática influencia significativamente os processos pedogenéticos e a distribuição das classes de solo.

A distribuição das chuvas no Maranhão apresenta alta sazonalidade, com uma estação chuvosa bem definida entre janeiro e junho, seguida por um período seco prolongado, especialmente no centro-norte do estado. Os totais anuais de precipitação na região norte são determinados principalmente pela influência direta da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto, na região centro-sul, destacam-se a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Villela, 2017; Mateus et al., 2025), da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS; Pinheiro et al., 2023) e a ocorrência cada vez mais frequente de bloqueios atmosféricos (Cavalcanti et al., 2002; Rodrigues & Woollings, 2017). Também atuam na região outros sistemas meteorológicos de escala sinótica e de mesoescala, como os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), a Alta da Bolívia (AB) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), além de modos de variabilidade climática, como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e o Modo Meridional do Atlântico (MMA) (Soares et al., 2023; Furtado et al., 2025). Esses sistemas e fenômenos modulam a variabilidade intrazonal, interanual e decadal da precipitação no Maranhão.

Essa alta variabilidade climática do estado influencia diretamente os fluxos de entrada e saída de água e nutrientes no solo, contribuindo para a formação de perfis distintos, mesmo em pequenas distâncias (Nimer, 1989; Tomasella et al., 2018). Durante a estação chuvosa, a abundância de água aumenta a lixiviação e a eluição, resultando na perda de bases e sílica e na formação de horizontes subsuperficiais enriquecidos por óxidos de ferro e alumínio. Nas regiões de alta pluviosidade e temperaturas altas e constantes, predominam os Latossolos e Argissolos fortemente intemperizados, com estrutura granular e alta porosidade (Santos et al., 2018). Já em áreas com menor disponibilidade hídrica ou chuvas mal distribuídas, como no sul do estado, observa-se a ocorrência de Neossolos, Planossolos e Cambissolos com desenvolvimento pedogenético mais incipiente e menor espessura dos horizontes diagnósticos (Ker et al., 2012; Resende et al., 2014).

As elevadas temperaturas médias anuais do estado aceleram os processos químicos de intemperismo e promovem a rápida decomposição da matéria orgânica. Esse fator contribui para a formação de solos com baixos teores de carbono orgânico, especialmente nas regiões de vegetação aberta e maior incidência solar. A redução do tempo de permanência da água no perfil do solo radiação solar e elevada evapotranspiração favorece a salinização em ambientes planos, e a perda de nutrientes por escoamento superficial, nos períodos de maior precipitação pluviométrica (Brady & Weil, 2013; Oliveira et al., 2022).

Com isso, os diferentes regimes climáticos do Maranhão não apenas condicionam os processos de pedogenéticos, mas também determinam sua vulnerabilidade à degradação, erosão e salinização. A compreensão dessas relações é essencial para o manejo sustentável do solo e para o planejamento agroambiental, sobretudo em um contexto de mudanças climáticas e crescente pressão antrópica sobre os recursos naturais.

5. CLASSES DE SOLO NO MARANHÃO E RELAÇÕES COM O CLIMA

A diversidade de classes de solo no Maranhão responde diretamente a este gradiente meridional (norte-sul) da distribuição dos elementos climáticos sobre o Maranhão. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), as principais classes de solos encontradas no estado incluem Latossolos, Argissolos, Neossolos, Planossolos, Cambissolos, Gleissolos e Plintossolos - cada uma com características morfológicas e químicas fortemente influenciadas pelos regimes de variabilidade espaço-temporal da temperatura do ar, radiação solar, umidade, precipitação e tempo de exposição ao intemperismo.

Nas regiões Norte e Noroeste, sob alta umidade e chuvas regulares, predominam os Latossolos Amarelos e Vermelhos, resultantes do intenso processo pedogenético de ferralitização - processo associado ao clima quente e úmido, em que há forte remoção de sílica e aumento relativo dos teores de óxidos de ferro e alumínio. Esses solos são profundos, bem drenados, altamente intemperizados e com baixos teores de nutrientes.

Nas regiões Centro-Norte e Centro-Oeste, com alternância mais marcada entre estação seca e chuvosa, predominam os Argissolos e Luvissolos, cuja formação está ligada à (eluviação/ iluviação) ou argiluviação e lessivagem - translocação de argilas dos horizontes superficiais para os subsuperficiais, formando um horizonte B textural. Esse processo é favorecido por chuvas intermitentes e períodos de redistribuição de água no perfil.

Nas regiões Sul e Sudeste do estado, onde a precipitação é mais escassa e a evapotranspiração elevada, são comuns os Neossolos, Planossolos e Cambissolos. Os Planossolos, resultam de processos como lessivagem e ferrólise, com levando a formação de um horizonte B de acúmulo de argila (B plânico) que possui permeabilidade lenta. Por vezes em nesse horizonte B pode ser observados elevados teores de Na, levando a ocorrência de Planossolos Nátricos (Santos et al, 2025). Em algumas áreas em ambientes com drenagem impedida pode ocorrer o acúmulo de sais, levando a forma de Gleissolos Sálicos, formados pelo processo pedogenético de salinização. Os Neossolos são solos jovens, com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, e os Cambissolos possuem um estágio intermediário de evolução.

Em áreas mal drenadas ou sujeitas a inundações periódicas, ocorrem os Gleissolos, formados pelo processo de gleização, caracterizado pela saturação hídrica e redução de ferro no ambiente subsuperficial. Também são encontrados Plintossolos, formados a partir do processo de plintitização, ou seja, que possuem plintita formada pela segregação do ferro em função das condições intermitentes de oxidação e redução.

A variação desses solos no espaço também está ligada à idade da superfície geomorfológica. Por exemplo, em superfícies planálticas antigas da região central são observados solos mais evoluídos, enquanto nas várzeas e áreas aluviais verificam-se solos mais jovens. Assim, clima e tempo interagem para moldar a distribuição pedológica maranhense.

Tabela 2. Processos pedogenéticos associados às classes de solo no Maranhão.

Classe de Solo	Processo Pedogenético Dominante	Ambiente Relacionado
Latossolos	Ferralsitação (laterização)	Clima quente e úmido, ambientes antigos
Argissolos	Eluviação/ Iluviação (Argiluviação) ou Lessivagem	Clima sazonal úmido, relevo ondulado
Luvissolos	Eluviação/ Iluviação (Argiluviação) ou Lessivagem	Regiões com materiais ricos e drenagem moderada
Planossolos	Lessivagem incompleta + Solonização	Ambientes mal drenados, planícies e depressões
Cambissolos	Intemperismo inicial	Relevos instáveis, rochas jovens ou intemperismo fraco
Neossolos	Ausência de pedogênese expressiva	Encostas, várzeas e ambientes instáveis
Gleissolos	Gleização (redução por saturação hídrica)	Áreas alagadas, solos hidromórficos
Plintossolos	Plintitização (mobilização e segregação de Fe)	Ambientes com alternância entre seca e encharcamento

Fonte: Dantas et al 2014; Santos, et al. 2018; Lepsch, 2010.

6. ÍNDICE DE ARIDEZ (IA) E A VULNERABILIDADE DOS SOLOS À DESERTIFICAÇÃO

A disponibilidade hídrica exerce influência determinante nos processos de formação, evolução e conservação dos solos. O Índice de Aridez (IA) é uma ferramenta amplamente utilizada para caracterizar o equilíbrio climático de uma região, sendo definido como a razão entre a precipitação anual (P) e a evapotranspiração potencial (ETP):

$$IA = \frac{P}{ETP}$$

Valores mais baixos do IA indicam déficit hídrico crescente, comprometendo os processos pedogenéticos e favorecendo a degradação dos solos. Nessas condições, a formação de horizontes é limitada, há menor acúmulo de matéria orgânica, o intemperismo químico é reduzido e intensificam-se processos como a salinização, erosão e compactação.

No Maranhão, a aplicação do IA tem sido essencial para compreender os contrastes entre as regiões úmidas do Norte e as zonas de transição climática no centro-sul, que já apresentam características de semiárido. Para este estudo, foi adotada uma classificação adaptada do IA, baseada na concatenação das propostas da UNEP (1992) e da Resolução CONAMA nº 339/2009, de forma a integrar tanto os critérios internacionais quanto os utilizados em políticas públicas nacionais. A Tabela 3 apresenta essa classificação climática integrada, com ênfase nas implicações edáficas.

Tabela 3. Classificação Climática com base no Índice de Aridez (IA).

Classe Climática	IA (P/ETP)	Implicações para a Pedogênese
Hiperárido	< 0,05	Ausência de intemperismo químico; solos incipientes ou inexistentes;
Árido	0,05 – 0,20	Intemperismo físico predominante; risco alto de salinização;
Semiárido	0,21 – 0,50	Solos rasos, pobres em matéria orgânica; erosão acelerada;
Subúmido seco	0,51 – 0,65	Pedogênese ativa, mas sensível à pressão antrópica e ao déficit hídrico;
Subúmido úmido	0,66 – 1,00	Solos com bom desenvolvimento, sujeitos a variações climáticas;
Úmido	> 1,00	Intemperismo intenso; solos profundos e bem estruturados.

Fonte: Concatenação entre UNEP (1992) e CONAMA (2009)

Além da caracterização climática, o IA também é utilizado como base para classificar áreas de acordo com seu nível de suscetibilidade à desertificação. Essa classificação, embora derivada do IA, tem foco ambiental e considera o risco de degradação associado ao balanço hídrico e à fragilidade dos ecossistemas locais.

O Mapa 1 apresenta a distribuição espacial do IA no Maranhão, calculado com base na climatologia recente. A análise revela um nítido gradiente climático no território maranhense, indo de condições úmidas no norte e noroeste para subúmidas e semiáridas no centro-sul e sudeste, refletindo diretamente a variação do regime pluviométrico e da evapotranspiração ao longo do estado.

A porção norte e oeste litorânea, incluindo microrregiões como Baixada Maranhense, apresenta valores de IA superiores a 1,00, situando-se na classe úmido, com elevados índices pluviométricos e predominância de solos profundos e altamente intemperizados como os Latossolos.

Na região central do estado, especialmente entre os municípios de Itapecuru, Codó, Chapadinha e Presidente Dutra, há predominância das classes subúmido úmido e subúmido seco (IA entre 0,51 e 1,00), com um regime de chuvas mais sazonal. Essa condição favorece solos como Argissolos e Cambissolos, sujeitos a processos de degradação caso manejados inadequadamente.

A semiaridez, por sua vez, encontra-se concentrada no centro-sul e sudeste do Maranhão, com destaque para municípios como Barão de Grajaú, São Francisco do Maranhão e Grajaú, onde o IA se situa entre 0,21 e 0,50. Essa condição indica um déficit hídrico estrutural, com impacto direto na formação e conservação dos solos. Nessas áreas, há predominância de solos mais rasos, sujeitos à erosão e com baixa capacidade de retenção hídrica, o que exige planejamento específico para o uso sustentável da terra e da água.

Esse diagnóstico climático é essencial não apenas para o entendimento do funcionamento atual dos sistemas edáficos, mas também como base para projeções futuras sobre a disponibilidade hídrica, o risco de degradação e a definição de estratégias de manejo. A Figura 1, portanto, representa uma ferramenta crucial para o zoneamento ambiental e a definição de áreas prioritárias para políticas públicas de adaptação climática.

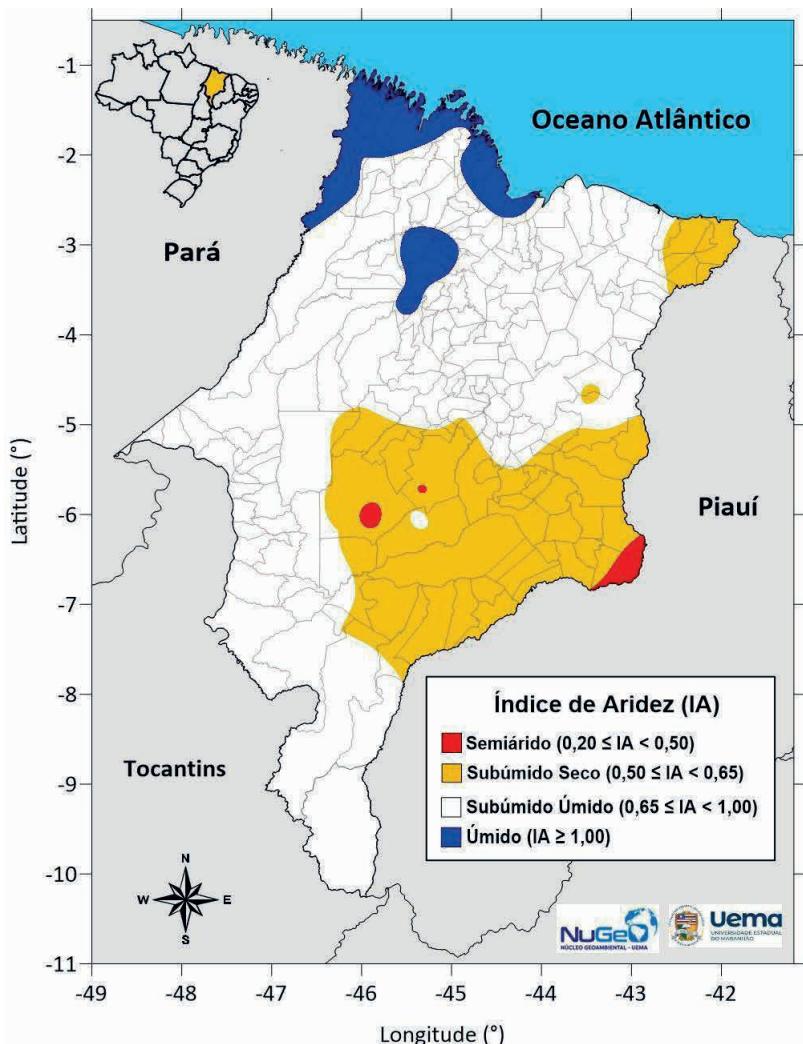


Figura 1. Espacialização do Índice de Aridez (IA) no estado do Maranhão.

Fonte: ZEE-MA (Catunda & Dias 2019; Dias et al., 2021), adaptado pelos autores.

A partir dos valores de IA, é possível estabelecer uma classificação do risco climático do Maranhão à desertificação. Essa suscetibilidade ambiental, embora derivada do IA, considera sua relação com a capacidade de suporte do solo e da vegetação sob diferentes regimes hídricos.

A Tabela 4 apresenta os intervalos de suscetibilidade adotados por Matallo Júnior (2003) e utilizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em suas diretrizes para o combate à desertificação.

Tabela 4. Níveis de suscetibilidade à desertificação com base no IA.

Nível de Suscetibilidade	Faixa do IA (P/ETP)	Observações
Muito alta	0,05 – 0,20	Condição de aridez severa; vegetação escassa e solos frágeis
Alta	0,21 – 0,50	Região semiárida; solos sujeitos à salinização, erosão e perda de fertilidade
Moderada	0,51 – 0,65	Áreas subúmidas secas; sensíveis à pressão antrópica e degradação gradual
Baixa	0,66 – 1,00	Áreas úmidas ou subúmidas úmidas com menor risco, mas não isentas de impactos

Fonte: Adaptado de Matallo Júnior (2003); MMA (2006).

A Figura 2 mostra o diagnóstico da suscetibilidade à desertificação no Maranhão, elaborado com base no cruzamento dos valores atuais de IA com os critérios estabelecidos na Tabela 2. Essa espacialização permite identificar com maior precisão as áreas onde o equilíbrio climático e edáfico encontra-se em estado crítico ou em progressivo risco ou comprometimento.

A análise do mapa revela que as porções centro-leste e nordeste do estado, incluindo o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM), mostraram-se mais suscetíveis à desertificação. As áreas de risco mais elevado (em marrom) concentram-se no centro-leste extremo (Barão de Grajaú e São Francisco do Maranhão), e pontualmente em dois locais no centro-oeste do estado (Barra do Corda e Grajaú), enquadrando-se na classe de muito alta suscetibilidade. Nesses locais, os solos são majoritariamente rasos, com baixos teores de matéria orgânica e presença frequente de processos erosivos e salinização, associados à sazonalidade da precipitação e à elevada taxa de evapotranspiração.

Essas áreas coincidem com regiões de significativa ocupação agrícola, muitas vezes conduzida com baixa cobertura vegetal permanente e práticas de manejo inadequadas, o que intensifica o processo de degradação física e química dos solos. Além disso, o rebaixamento do lençol freático e a compactação do solo por uso intensivo contribuem para reduzir ainda mais a resiliência dos ecossistemas diante de alterações climáticas.

Por outro lado, a faixa norte — incluindo microrregiões do Gurupi, Pindaré e Baixada Maranhense — apresenta níveis de risco baixo, sustentados por maiores índices pluviométricos e solos mais profundos e bem drenados, em áreas ainda recobertas por vegetação nativa em bom estado de conservação.

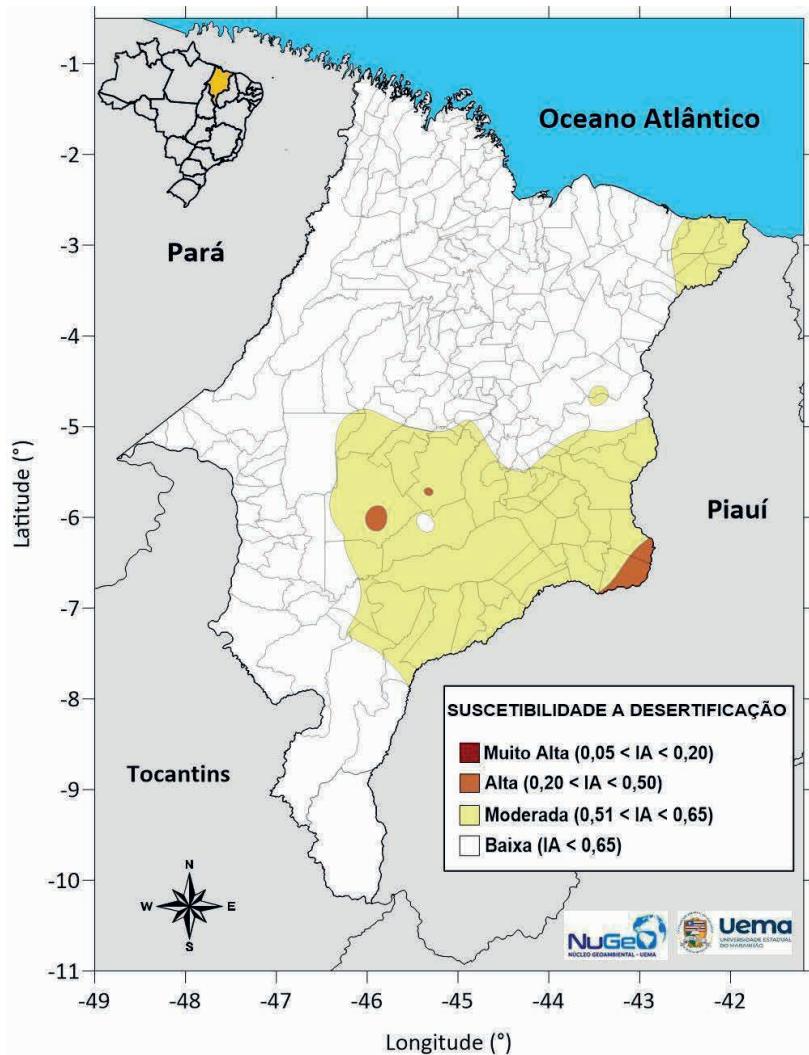


Figura 2. Espacialização da suscetibilidade à desertificação no Maranhão.

[Fonte: Elaboração própria (inédito)].

Essa leitura espacial do risco não apenas ajuda a compreender a vulnerabilidade atual do território, mas também indica com clareza onde devem ser priorizadas ações de prevenção e mitigação da desertificação. O diagnóstico pode subsidiar planos municipais de combate à desertificação, orientar projetos de reflorestamento e manejo sustentável, e guiar o redirecionamento de zonas produtivas para atividades de menor impacto hídrico e edáfico. Essas informações são fundamentais para orientar o planejamento territorial, o zoneamento agrícola e o direcionamento de políticas públicas de conservação do solo, especialmente em municípios com uso intensivo da terra e baixa resiliência climática.

Estudos recentes indicam que o estado do Maranhão poderá enfrentar sérios desafios relacionados à disponibilidade hídrica nas próximas décadas, especialmente em função das mudanças climáticas. Um levantamento conduzido pela Fiocruz, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, avaliou a vulnerabilidade dos 217 municípios maranhenses às alterações climáticas até o ano de 2070. As projeções do estudo apontam para um aumento significativo da temperatura do ar em todo o estado, podendo ultrapassar os 5 °C em áreas do oeste maranhense. Além disso, estima-se uma redução de até 32% no volume de chuvas, o que, associado ao aumento do número de dias consecutivos sem precipitação, especialmente no centro-oeste, compromete a recarga hídrica do solo, reduz a umidade edáfica, acelera processos de degradação como compactação e erosão, interfere na formação e estabilidade dos horizontes e limita a evolução pedogenética (FioCruz, 2017).

Complementando esse panorama, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) também publicou um estudo de âmbito nacional sobre os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos brasileiros, incluindo projeções específicas para o Maranhão. Segundo o relatório, até 2040 diversas bacias hidrográficas no estado poderão apresentar redução superior a 40% na disponibilidade hídrica, sobretudo nas regiões com maior variabilidade climática e uso intensivo da água. Essa redução deve afetar diretamente a dinâmica hidrológica do solo, exigindo estratégias de adaptação voltadas à conservação dos recursos edáficos, como o manejo da cobertura vegetal, o controle da erosão e a adoção de práticas que favoreçam a infiltração e a retenção de água nos perfis (ANA, 2020).

Neste sentido, na próxima seção, serão discutidos os cenários climáticos projetados pelo IPCC (RCP 4.5 e RCP 8.5) e seus efeitos sobre o IA e os processos pedogenéticos no estado do Maranhão.

7. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS CENÁRIOS DO CMIP5: IMPLICAÇÕES PARA OS SOLOS MARANHENSES

As mudanças climáticas globais têm provocado alterações significativas nos regimes de temperatura do ar, precipitação e umidade do solo, afetando diretamente os processos pedogenéticos e a qualidade dos solos em diversas regiões. No contexto maranhense, como apresentado anteriormente, essa problemática é particularmente sensível, uma vez que parte significativa do estado se encontra em zonas de transição climática, com tendência à redução do balanço hídrico e aumento da aridez.

Uma das abordagens mais utilizadas internacionalmente para a projeção de impactos das mudanças climáticas é a utilização dos Cenários Representativos de Concentração Radiativa (RCPs - *Representative Concentration Pathways*), apresentados no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), fundamentados nos experimentos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Esses cenários representam diferentes trajetórias possíveis de emissão de gases de efeito estufa (GEE) até o final do século XXI, refletindo distintos níveis de aquecimento global associados ao forçamento radiativo (em W/m^2). Entre os experimentos mais analisados em estudos de regionalização de projeções climáticas destacam-se o RCP 4.5, considerado um cenário intermediário, que pressupõe estabilização das emissões sem a necessidade de reduções agressivas e leva a um forçamento radiativo de aproximadamente $4,5 \text{ W/m}^2$ até 2100; e o RCP 8.5, um cenário pessimista que assume altas emissões contínuas de GEE, resultando em um forçamento radiativo de $8,5 \text{ W/m}^2$ até 2100. Ambos os cenários projetam um aumento na temperatura média global, alterações nos padrões de precipitação e elevação da evapotranspiração potencial, o que tende a reduzir os valores do IA nas regiões mais vulneráveis do estado do Maranhão.

Com o objetivo de fornecer a base climática para projetar possíveis mudanças na variabilidade dos solos no estado do Maranhão, foram avaliadas as saídas numéricas do modelo climático regional Eta-CPTEC/INPE como ferramenta de regionalização dinâmica de cenários climáticos globais. O Eta é amplamente utilizado em simulações de *downscaling* dinâmico. O modelo Eta pertence à categoria de modelos de mesoescala, ou seja, é projetado para representar fenômenos atmosféricos de média escala espacial e temporal. No CPTEC/INPE, são utilizadas duas versões do modelo: uma com resolução horizontal de 40 km e outra mais refinada, com 20 km de resolução. Ambas operam com 38 camadas verticais e têm abrangência geográfica suficiente para cobrir quase toda a América do Sul, permitindo simulações mais detalhadas e representativas da variabilidade climática regional (Silva et al., 2023; Chou et al., 2012; Marengo et al., 2012). A versão utilizada do modelo neste estudo foi especialmente desenvolvida para simulações de cenários futuros (Mesinger, 1984; Chou et al. 2012; Pesquero et al. 2010). As simulações utilizadas

possuem resolução de 20 km e foram forçadas por um modelo global do CMIP5, o CanESM2 (Arora et al. 2011; Chylek et al. 2011). Esse modelo fornece as condições iniciais e de contorno necessárias para a execução do modelo Eta, incluindo variáveis atmosféricas (temperatura, umidade, vento e pressão), temperatura da superfície do mar (SST), além de informações sobre umidade e temperatura do solo. As condições de contorno laterais foram atualizadas a cada 6 horas, e a SST foi incorporada ao modelo na frequência diária.

Os impactos das mudanças climáticas sobre o solo foram avaliados com base em médias anuais calculadas a partir de dados mensais de precipitação e temperatura do ar a 2 m, obtidos do modelo Eta-CPTEC/INPE para os cenários climáticos: *i*) experimento Histórico, representando o clima presente; e *ii*) experimento RCP8.5, projeção de clima futuro com altas emissões de gases de efeito estufa. O cenário de clima futuro foi avaliado para três períodos distintos: nas primeiras décadas (2006-2040), em meados (2041-2070) e no final (2071-2099) do século XXI. As alterações no clima do Maranhão são avaliadas através das diferenças espaciais entre os experimentos RCP8.5-Histórico, permitindo assim a identificação de extremos de precipitação (seca/chuvas) e de temperatura do ar ao longo do tempo.

O cenário de clima futuro RCP8.5, em relação ao experimento histórico, mostra um crescente aumento da temperatura do ar em superfície no estado do Maranhão, com valores aumentando em 1,5°C nas primeiras décadas (2006-2040), passando a 3,5°C na metade do século (2041-2070) e ultrapassando os 6°C na última década (2071-2099). As regiões que serão submetidas aos maiores aquecimentos concentram-se no centro-oeste do estado, em especial nas proximidades dos municípios de Pedreiras e Presidente Dutra, cuja temperatura do ar atingirá 7°C no final do século (Figura 3, terceira coluna).

O cenário de clima futuro RCP8.5, em relação ao experimento histórico, mostra uma tendência de redução da precipitação no Maranhão, com os maiores déficits (< 7 mm) ocorrendo na região litorânea do estado (Figura 4). Nas primeiras décadas (2006-2040) os maiores déficits de precipitação deverão ocorrer no litoral ocidental, no extremo oeste e na região centro-oeste do estado. Na metade do século (2041-2070) uma redução de 2-3 mm é projetada para ocorrer em todo o estado, com menores valores ocorrendo na região sul. No final do século, entretanto, o déficit de precipitação deverá aumentar (4-3 mm menor) em todo o estado, mais intensamente sobre o litoral ocidental (Figura 4, terceira coluna).

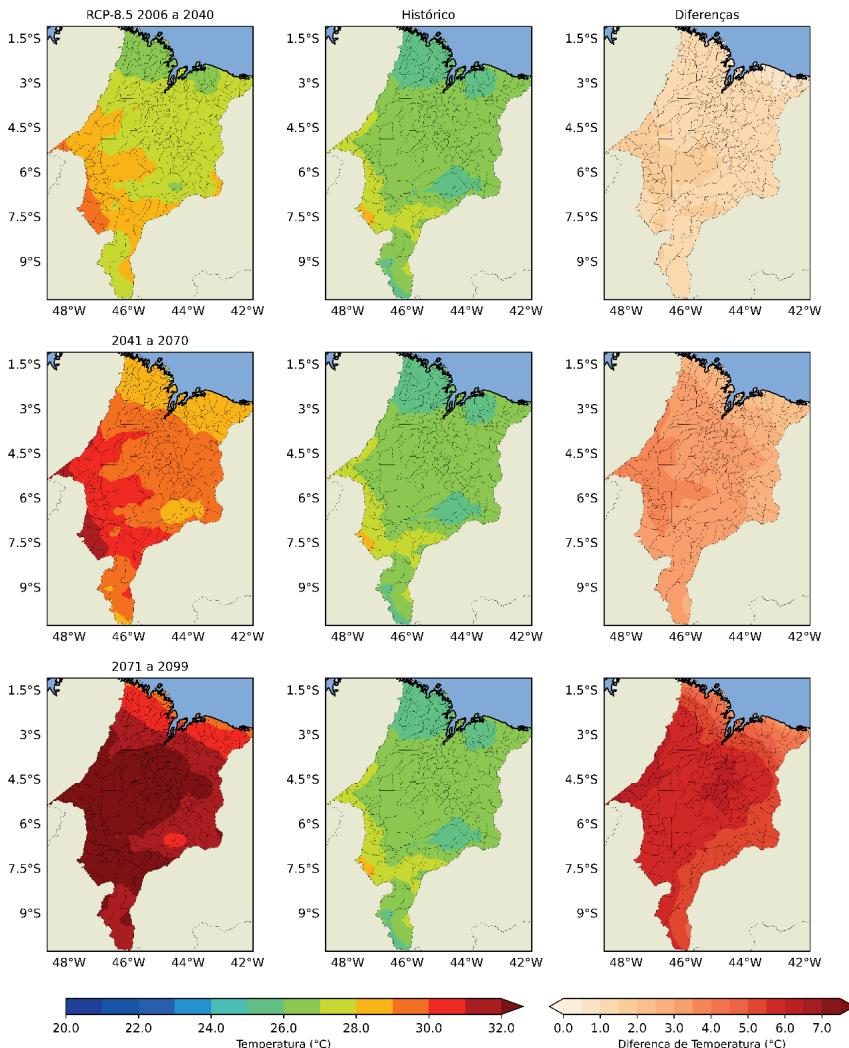


Figura 3. Regionalização de cenários climáticos de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) no estado do Maranhão com o modelo regional Eta-CPTEC/INPE analisados para os diferentes períodos do século XXI (2006-2040; 2041-2070 e 2071-2099): Cenário RCP8.5 (primeira coluna); Cenário do clima presente (segunda coluna); e diferenças RCP8.5-histórico (terceira coluna). - Fonte: Elaboração própria (inédito).

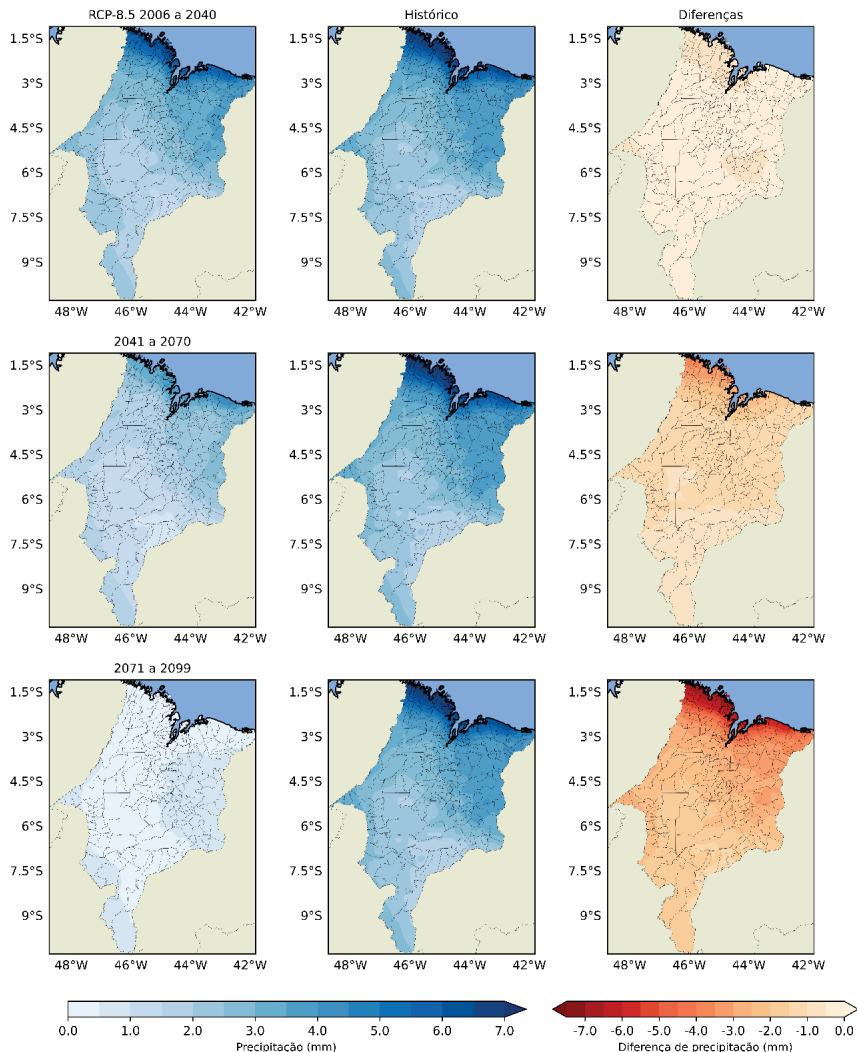


Figura 4. Regionalização de cenários climáticos de precipitação (mm) no estado do Maranhão com o modelo regional Eta-CPTEC/INPE analisados para os diferentes períodos do século XXI (2006-2040; 2041-2070 e 2071-2099): Cenário RCP8.5 (primeira coluna); Cenário do clima presente (segunda coluna); e diferenças RCP8.5-histórico (terceira coluna). - Fonte: Elaboração própria (inédito).

Para identificar períodos de extremos climáticos de seca/chuvas e sua duração foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizado (SPI – *Standardized Precipitation Index*; WMO, 2012). O SPI é um indicador climático amplamente utilizado para caracterizar e monitorar condições de seca e umidade, com base apenas em dados de precipitação. Neste estudo, o cálculo envolveu a análise da precipitação acumulada na escala de tempo agrícola, ou seja, de 6 meses, permitindo a detecção de secas/chuvas de curta a longa duração (Teodoro et al. 2015). Valores negativos de SPI indicam condições de seca, cuja severidade aumenta com a magnitude negativa do índice, enquanto valores positivos indicam excesso de umidade. Por sua flexibilidade temporal e simplicidade metodológica, o SPI é uma ferramenta eficaz para o monitoramento climático e pedológico, contribuindo significativamente para a gestão de riscos hidrológicos. Quando aplicado na escala de 6 meses, como neste capítulo, o SPI é especialmente útil para classificar secas agrícolas, uma vez que déficits prolongados de precipitação resultam em redução da umidade do solo, fator crítico para a produtividade agrícola e para o planejamento de práticas de manejo. Além disso, a escala de 6 meses é também considerada a mais apropriada ao regime de chuvas do Maranhão, que é caracterizado por uma estação chuvosa bem definida seguida por um período seco (clima de Monções).

Tabela 5 - Categorias e classificação do SPI. Adaptado de McKee et al. (1993).

SPI-6	Classificação	Condição Hidrológica
≥ 2.0	Extremamente úmido	Chuvas muito acima da média
1.5 a 1.99	Severamente úmido	Período bem mais úmido que o normal
1.0 a 1.49	Moderadamente úmido	Acima da média
-0.99 a 0.99	Normal	Condição climatológica dentro da média
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco	Déficit de precipitação
-1.5 a -1.99	Severamente seco	Seca significativa
≤ -2.0	Extremamente seco	Seca extrema

O SPI foi calculado para três localidades no estado do Maranhão escolhidas para representar diferentes zonas climáticas, no caso, Cândido Mendes (clima equatorial), Grajaú (clima semiárido) e Imperatriz (clima tropical) e como elas respondem às mudanças climáticas.

Em geral, para o clima presente, os resultados mostram que as maiores amplitudes negativas do SPI (eventos de seca) ocorreram nas zonas de clima equatorial e semiárido, com destaque para os anos de 1983, 1990, 1993 e 2004, com 1994 representando o episódio de seca mais prolongada em todas as zonas climáticas (primeira linha das Figuras 5-7). Em 1994, o Brasil enfrentou uma seca histórica que

afetou diversas regiões e estados, incluindo o Maranhão. Este episódio de seca foi intensificado por anomalias na circulação atmosférica associadas ao fenômeno El Niño, caracterizado pelo aquecimento anômalo das águas do Oceano Pacífico equatorial (INMET, 2023). Esse aquecimento alterou o padrão da circulação zonal tropical, resultando no enfraquecimento dos ventos alísios, responsáveis pelo transporte de umidade do Atlântico para o continente sul-americano, e na consequente redução da convergência de umidade sobre o Norte e Nordeste do Brasil, incluindo o Maranhão. Além disso, houve o deslocamento para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o que comprometeu a formação de nuvens convectivas e, consequentemente, a precipitação sobre a região. Esse bloqueio dos ventos resultou em escassez prolongada de chuvas, com impactos significativos nos solos, na agricultura e no abastecimento hídrico.

No cenário futuro RCP8.5, os anos de 2032-2033 destacaram-se por projetarem os eventos mais duradouros de seca do período, conforme evidenciado pelas amplitudes negativas e persistentes do SPI (segunda linha das Figura 5-7). Em meados do século, os anos de 2068-2069 mostraram amplitudes negativas e muito persistentes do SPI (seca muito prolongada, > 2 anos) (terceira linha das Figura 5-7). Com o tempo, há também uma quebra nos eventos de chuva, principalmente no final deste período. Para o final do século, é evidente a predominância de valores negativos de SPI sobre os valores positivos. Esses últimos, inclusive, tornam-se bastante escassos em todas as zonas climáticas, estando o clima equatorial mais vulnerável em termos de duração da seca e os climas semiárido e tropical em termos de intensidade da seca (quarta linha das Figura 5-7).

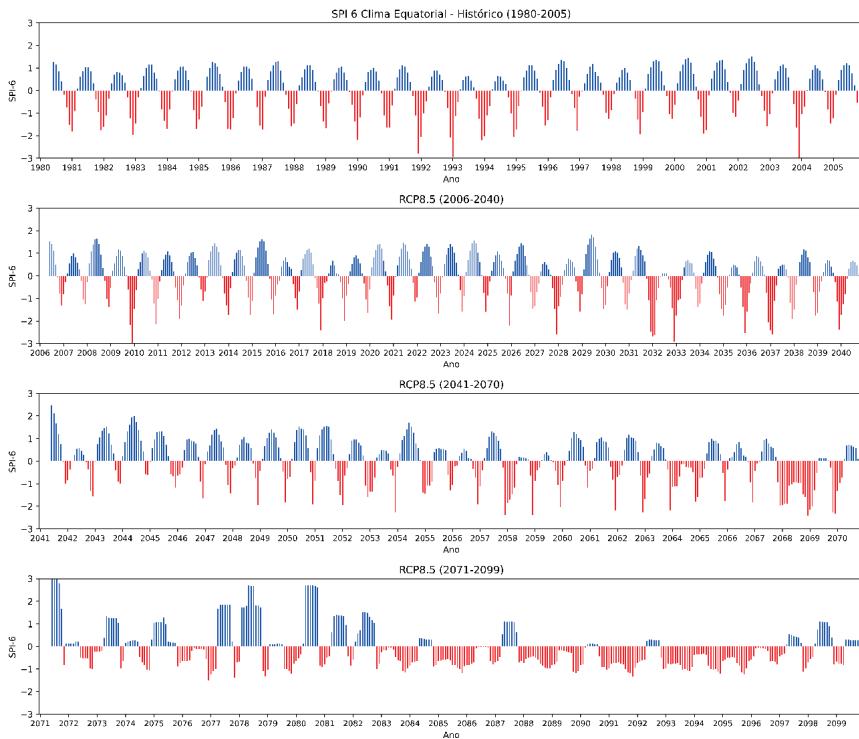


Figura 5. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Cândido Mendes (clima equatorial).

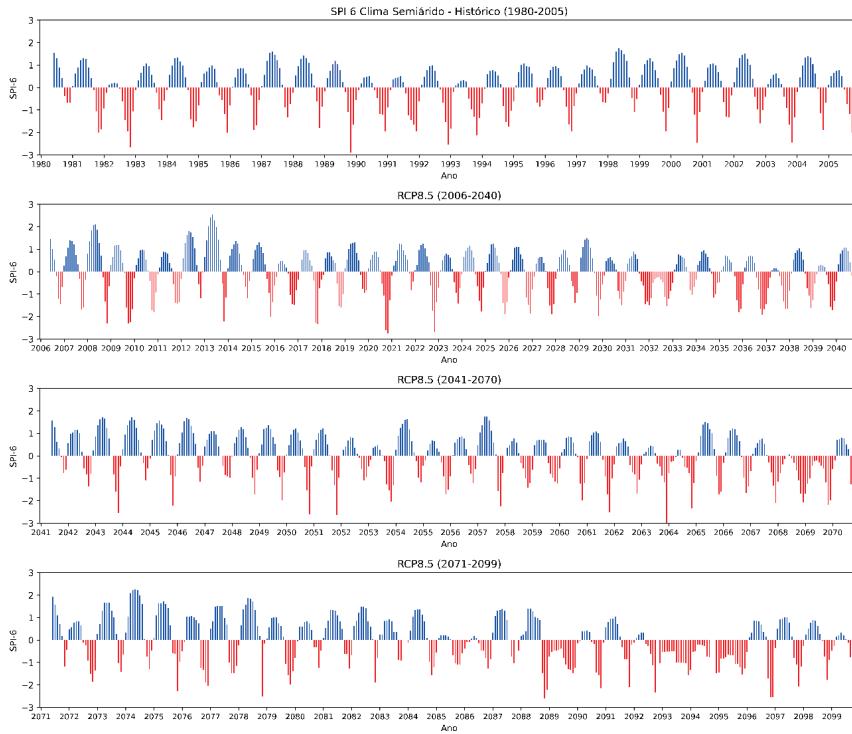


Figura 6. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Grajaú (clima semiárido).

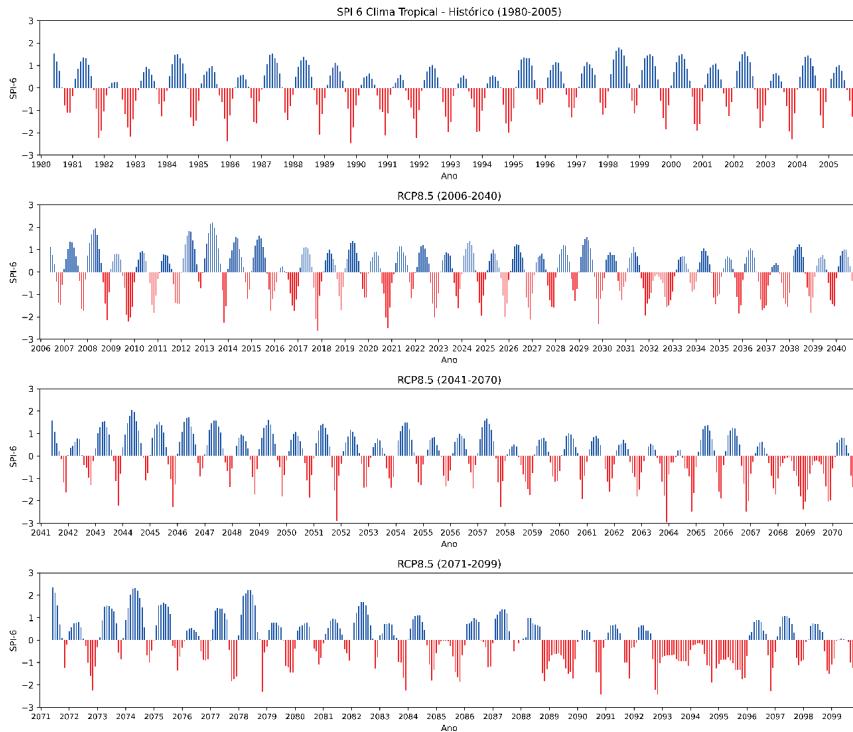


Figura 7. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Imperatriz (clima tropical).

Essas alterações têm implicações diretas sobre os solos, entre as quais se destacam: i) Elevação do déficit hídrico: Redução da umidade do solo, impactando negativamente a atividade biológica e a formação de novos horizontes; ii) Intensificação da erosão hídrica: Chuvas mais intensas e irregulares aumentam a degradação superficial do solo; iii) Perda de matéria orgânica: Maiores temperaturas aceleram a decomposição e reduzem a estabilidade estrutural; iv) Expansão da salinização e compactação: Em solos mal drenados, a evaporação intensa pode favorecer o acúmulo de sais; v) Redução da fertilidade natural: A lixiviação de nutrientes tende a se acentuar em ciclos de chuvas intensas seguidos por secas prolongadas.

Além disso, simulações de IA sob cenários RCP indicam que áreas atualmente classificadas como subúmidas secas poderão migrar para a faixa semiárida, especialmente sob RCP 8.5. Essa alteração modifica o zoneamento agroecológico, afeta a aptidão agrícola e agrava o risco de desertificação. A **Figura 8** ilustra a projeção espacial do IA no Maranhão sob o cenário RCP 8.5 até 2059, evidenciando a intensificação da aridez em regiões do centro-sul e leste do estado.

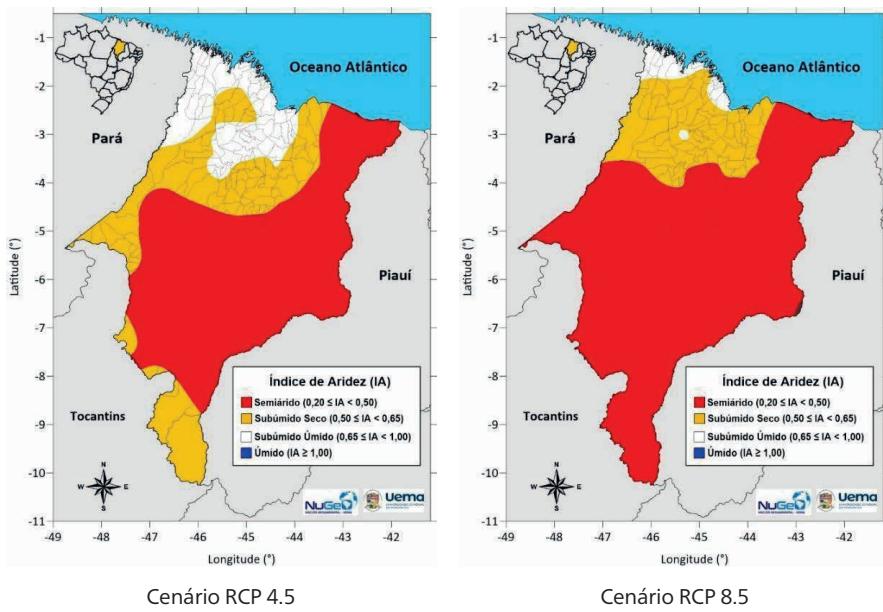


Figura 8. Projeção do Índice de Aridez (IA) no Maranhão até 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.

Fonte: ZEE (Catunda & Dias 2019; Dias et al., 2021), adaptado pelos autores.

A Tabela 6 resume a redistribuição das classes climáticas com base no IA evidenciando a eliminação total da classe úmido e um avanço expressivo do semiárido, que passa de 0,59% para 56,60% (RCP 4.5) e 75,65% (RCP 8.5) da área do estado. Isso reflete um deslocamento climático abrupto já mencionado, especialmente nas regiões do centro-sul e leste maranhense.

Tabela 6. Redistribuição das classes do Índice de Aridez no Maranhão segundo cenários de mudanças climáticas

ÍNDICE DE ARIEZ	DIAGNÓSTICO		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
ÚMIDO	24.329,3	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0
SUBÚMIDO ÚMIDO	232.594,7	70,0	56.989,0	17,2	22.080,0	6,7
SUBÚMIDO SECO	73.038,0	22,0	87.060,0	26,2	58.744,0	17,7
SEMIÁRIDO	1.975,0	0,6	187.888,0	56,6	251.113,0	75,7

Fonte: ZEE - MA (Catunda & Dias 2019; Dias et al., 2021), adaptado pelos autores.

A intensificação do processo de aridificação no estado também tem reflexos diretos sobre a suscetibilidade à desertificação. A Figura 9 ilustra as projeções espaciais do risco de desertificação no Maranhão até 2059, segundo os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Em ambos os casos, observa-se um avanço das faixas de risco elevado sobre regiões anteriormente classificadas como de baixa e moderada suscetibilidade, principalmente no centro-sul e leste do estado. Esse reposicionamento do risco reforça a gravidade das mudanças previstas no regime hídrico e sua influência sobre a estabilidade dos solos.

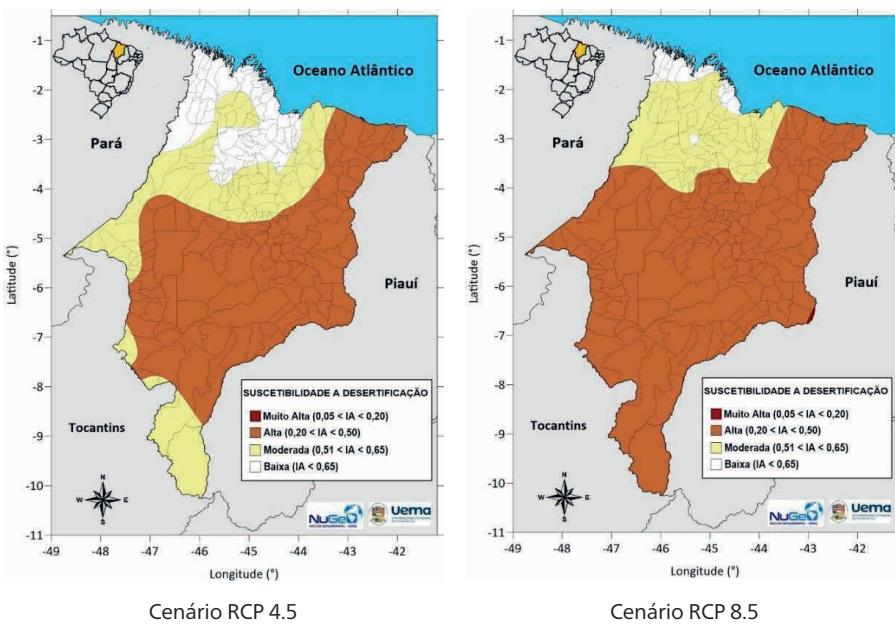


Figura 9. Projeção da suscetibilidade à desertificação no Maranhão em 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.

Fonte: Elaboração própria (inédito).

Os dados da Tabela 7 reforçam a tendência de agravamento da vulnerabilidade edáfica frente às mudanças climáticas. No diagnóstico atual, a maior parte do território estadual (72,8%) encontra-se na categoria de risco baixo, enquanto as classes “alta” e “muito alta” são praticamente inexistentes. Sob o cenário RCP 4.5, essa configuração se inverte: a classe alta passa a predominar, ocupando 57,6% da área do estado, enquanto a classe baixa apresenta uma redução drástica, limitando-se a 17,0%. O cenário RCP 8.5 projeta uma situação ainda mais crítica, com desaparecimento completo da classe de risco baixo, avanço da classe alta para 82,4% da área e

surgimento da classe muito alta, que passa a ocupar áreas do centro-sul e leste maranhense. Esses resultados indicam não apenas a intensificação do estresse hídrico, mas também a urgência em reformular políticas públicas voltadas à conservação do solo, sobretudo em municípios com uso intensivo da terra e baixa resiliência climática.

Tabela 7. Projeção da suscetibilidade à desertificação no Maranhão segundo cenários de mudanças climáticas.

ÍNDICE DE ARIDEZ	DIAGNÓSTICO		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
ÚMIDO	24.329,3	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0
SUBÚMIDO ÚMIDO	232.594,7	70,0	56.989,0	17,2	22.080,0	6,7
SUBÚMIDO SECO	73.038,0	22,0	87.060,0	26,2	58.744,0	17,7
SEMIÁRIDO	1.975,0	0,6	187.888,0	56,6	251.113,0	75,7

ÍNDICE DE ARIDEZ	DIAGNÓSTICO		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
MUITO ALTA	0,0	0,0	0,0	0,0	1.093,8	0,3
ALTA	2.438,8	0,7	191.300,8	57,6	273.645,2	82,4
MODERADA	87.956,0	26,5	84.072,6	25,3	57.198,0	17,2
BAIXA	241.542,2	72,8	56.563,6	17,0	0,0	0,0

Fonte: Elaboração própria (inédito).

No Sexto Relatório de Avaliação (AR6), publicado em 2021, os cenários RCPs foram substituídos pelos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), utilizados nos experimentos do CMIP6. Esses novos cenários incorporam não apenas as concentrações de gases de efeito estufa (GEE), mas também diferentes trajetórias socioeconômicas futuras, permitindo projeções mais integradas e realistas das mudanças climáticas e de suas interações com o desenvolvimento humano.

8. CONCLUSÃO

A formação e a distribuição dos solos no Maranhão resultam da interação complexa entre fatores climáticos, geológicos, biológicos, químicos e temporais, com o clima exercendo papel particularmente decisivo na modelagem dos perfis edáficos. O gradiente climático do estado, que vai de zonas úmidas a áreas com tendência à semi-aridez, favorece uma diversidade expressiva de classes de solo, cujos processos pedogenéticos, como ferralitização, eluviação/iluviação (argiluvização) ou lessivagem, gleização e plintitização, são diretamente influenciados pelos regimes espaço-temporais de temperatura, precipitação e umidade do solo.

O uso do Índice de Aridez (IA) como ferramenta de diagnóstico revelou-se essencial para compreender a vulnerabilidade edáfica do estado. A associação entre IA, suscetibilidade à desertificação e mudanças no regime climático permite identificar áreas críticas, particularmente no centro-sul maranhense, que já apresentam sinais de degradação acelerada. Projeções com base nos cenários RCP 4.5 e 8.5 indicam tendência de intensificação da aridez e aumento de tensores sobre os sistemas pedológicos, o que exigirá estratégias adaptativas urgentes.

Diante desse panorama, é essencial integrar informações climáticas, pedológicas e socioambientais nas políticas públicas de gestão territorial. Essa abordagem integrativa e multidisciplinar pode aprimorar zoneamentos agroecológicos e ecológico-econômicos, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas sobre os solos, um recurso essencial para a segurança alimentar, a sustentabilidade dos ecossistemas e o desenvolvimento regional. A adoção de estratégias adaptativas, como práticas conservacionistas, reflorestamento e monitoramento do balanço hídrico e da qualidade do solo, é crucial para promover o uso sustentável dos recursos naturais no estado do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Domínios morfoclimáticos e geográficos do Brasil. *Geografia*, São Paulo, n. 41, p. 1–39, 1977.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas das áreas suscetíveis à desertificação no Brasil. Brasília: ANA/MMA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/>. Acesso em: abr. 2025.

ARORA, V. K. et al. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 5, 2011.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.

CATUNDA, P. H. A.; DIAS, L. J. (orgs.). Sumário executivo do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão – ZEE: etapa Bioma Amazônico. 1. ed. São Luís: IMESC, 2019. v. 1. 493 p.

CAVALCANTI, I. F. A. et al. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. *Journal of Climate*, v. 15, n. 21, p. 2965–2988, 2002.

CHOU, S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38, n. 3–4, p. 635–653, 2012.

CHYLEK, P. et al. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, p. 22893–22907, 2011.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 339, de 25 de setembro de 2003. Define áreas suscetíveis à desertificação no Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.

DANTAS, J. S. et al. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1039–1050, 2014.

DIAS, L. J.; CATUNDA, P. H. A.; CARVALHO, D. S.; PORTELA, A. K. O. (orgs.). Sumário executivo do Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão (ZEE-MA): meio físico-biótico: etapa Bioma Cerrado e Sistema Costeiro. 1. ed. São Luís: IMESC, 2021. v. 2. 441 p.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

FURTADO, T. M. S. et al. Variability of the Atlantic Niño: impacts on precipitation in the state of Maranhão, Brazil. *Atmosfera*, v. 39, p. 225–246, 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico de pedologia. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IMESC. Sumário executivo do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão – etapa Bioma Amazônico. São Luís: IMESC, 2019. Disponível em: <https://homologacao.zee.ma.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/Sumario-Executivo-do-Zoneamento-Ecologico-Economico-Etapa-Bioma-Amazonico.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

IMESC. Sumário executivo do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão – etapa Bioma Cerrado e Sistema Costeiro. São Luís: IMESC, 2020. Disponível em: <https://homologacao.zee.ma.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/Sumario-Executivo-Volume-1-Cerrado.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas do Brasil 1991–2020. Brasília: INMET, 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: abr. 2025.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Projeções climáticas para o Brasil: atualizações a partir do CMIP5 e do PBMC. São José dos Campos: INPE, 2020.

KER, J. C. et al. Classificação, caracterização e uso de solos tropicais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 3, p. 865–879, 2012.

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

MACEDO, R. S. et al. Solos e suas relações com o clima no semiárido brasileiro. Cadernos de Geociências do Nordeste, v. 8, n. 2, p. 56–72, 2021.

MATALLO JÚNIOR, H. A desertificação no Brasil: áreas e ações prioritárias. Brasília: MMA/ PNUD, 2003. 112 p.

MATEUS, N. A. et al. The impacts of the spatial variation of South Atlantic Convergence Zone on rainfall, flow and water quality in River Doce, Brazil. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, n. 1, 2025.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, Boston. Boston: AMS, 1993. p. 179–184.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Rivista di Meteorologia Aeronautica, v. 44, p. 195–202, 1984.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca – PAN Brasil. Brasília: MMA, 2020.

MORAES, E. L.; COSTA, F. J. Influência do clima na gênese e características dos solos. In: _____. Solos e desenvolvimento sustentável. São Paulo: EdUSP, 2009.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

NOBRE, C. A. et al. Cenários de mudanças climáticas e seus impactos potenciais para o Brasil. Revista USP, São Paulo, n. 123, p. 47–64, 2019.

OLIVEIRA, J. B. Pedologia aplicada. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 2005. 574 p.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Relatório de avaliação nacional das mudanças climáticas: bases científicas. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2013. 325 p.

PESQUERO, J. F. et al. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the ETA model. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 99, p. 75–93, 2010.

PINHEIRO, J. M. et al. Identification of climatic patterns and atmospheric dynamics in São Luís, Maranhão. *Geoambiente On-line*, Goiânia, n. 47, 2023.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 6, p. 1–17, 2010.

RESENDE, M. et al. Pedologia: base para distinção de ambientes. 6. ed. rev. ampl. Lavras: UFLA, 2014. 372 p.

RODRIGUES, R. R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer. *Journal of Climate*, v. 30, p. 1821–1837, 2017.

SANTOS, H. G. dos et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, G. K. D. et al. Eta Model and CMIP5 climate change projections for the São Francisco and Paraíba do Sul River Basins, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 38, p. e38210072, 2023.

SOARES, L. A. M. et al. Influences of strong and moderate ENSO events on the Maranhão precipitation from the western equatorial Atlantic SST anomalies. *Ocean and Coastal Research*, v. 71, p. 1–19, 2023.

SUGUIO, K. et al. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 273–286, 1985.

TEODORO, P. E. et al. Analysis of the occurrence of wet and drought periods using standardized precipitation index in Mato Grosso do Sul State, Brazil. Journal of Agronomy, v. 14, n. 2, p. 80–86, 2015.

TOMASELLA, J. et al. Modelagem da vulnerabilidade ambiental à desertificação no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 53, n. 6, p. 744–757, 2018.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. World atlas of desertification. 2. ed. London: Arnold, 1992.

VILLELA, R. The South Atlantic Convergence Zone: a critical view and overview. Revista do Instituto Geológico, v. 38, 2017.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Standardized precipitation index user guide. Geneva: WMO, 2012. (WMO-No. 1090). Disponível em: https://library.wmo.int/docnum.php?explnum_id=7768. Acesso em: 12 jun. 2025.