

Glécio Machado Siqueira
Marcos Gervasio Pereira
Lúcia Helena Cunha dos Anjos
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

SOLOS DO MARANHÃO

Gênese, Classificação e Pedometria

 **Atena**
Editora
Ano 2025

Glécio Machado Siqueira
Marcos Gervasio Pereira
Lúcia Helena Cunha dos Anjos
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

SOLOS DO MARANHÃO

Gênese, Classificação e Pedometria

 **Atena**
Editora
Ano 2025

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo desta obra, em sua forma, correção e confiabilidade, é de responsabilidade exclusiva dos autores. As opiniões e ideias aqui expressas não refletem, necessariamente, a posição da Atena Editora, que atua apenas como mediadora no processo de publicação. Dessa forma, a responsabilidade pelas informações apresentadas e pelas interpretações decorrentes de sua leitura cabe integralmente aos autores.

A Atena Editora atua com transparência, ética e responsabilidade em todas as etapas do processo editorial. Nosso objetivo é garantir a qualidade da produção e o respeito à autoria, assegurando que cada obra seja entregue ao público com cuidado e profissionalismo.

Para cumprir esse papel, adotamos práticas editoriais que visam assegurar a integridade das obras, prevenindo irregularidades e conduzindo o processo de forma justa e transparente. Nosso compromisso vai além da publicação, buscamos apoiar a difusão do conhecimento, da literatura e da cultura em suas diversas expressões, sempre preservando a autonomia intelectual dos autores e promovendo o acesso a diferentes formas de pensamento e criação.

Solos do Maranhão: gênese, classificação e pedometria

| Autores:

Glécio Machado Siqueira
Marcos Gervasio Pereira
Lúcia Helena Cunha dos Anjos
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

| Revisão:

Os autores

| Diagramação:

Thamires Camili Gayde

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S689 Solos do Maranhão: gênese, classificação e pedometria / Glécio Machado Siqueira, Marcos Gervasio Pereira, Lúcia Helena Cunha dos Anjos, et al. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Outros autores
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3604-1
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.041251909>

1. Maranhão - Solos. I. Siqueira, Glécio Machado. II. Pereira, Marcos Gervasio. III. Anjos, Lúcia Helena Cunha dos. IV. Título.
CDD 918.121

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

+55 (42) 3323-5493

+55 (42) 99955-2866

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfnas

PREFÁCIO

PREFÁCIO

Quando portugueses e franceses aportaram às costas do Maranhão no século XVII os povos originais praticavam uma agricultura itinerante, rudimentar, abrindo nas matas pequenas clareiras que se recompunham rapidamente. Técnica que os europeus rapidamente adotaram.

Em 1642 quando da invasão holandesa já 5 engenhos de açúcar estavam estabelecidos na “Ribeira do Itapecuru”. No início do século XVIII as culturas do algodão e do arroz foram introduzidas. Em 1808 a região do rio Itapecuru já era um produtor de arroz, mas, em compensação, as matas da “Ribeira do Itapecuru” já tinham sido devastadas.

Segundo Raimundo Lopes até 1930 as margens superiores do Gurupi, Turiaçu e Pindaré ainda não estavam exploradas. Foram necessários apenas 50 anos para serem devastadas.

As florestas tropicais podem ser consideradas “sistemas estacionários”. Usando a energia trocada com o ambiente externo, retiram minerais do solo e os inserem no seu sistema. Esses minerais retornam ao solo em reciclagem.

Nos sistemas agrícolas, ao contrário, ocorrem trocas ativas de matéria e energia com o ambiente externo e parte dos nutrientes usados pelo sistema não retornam ao solo e têm que ser substituídos.

É a capacidade do solo de suprir esses nutrientes, de uma dessas possibilidades, que determinam a maior ou menor viabilidade de um sistema contínuo de produção agrícola.

Cabe essencialmente aos agrônomos, e particularmente aos que se dedicam à Ciência do Solo, desenvolver, sistematizar e melhorar sistemas que permitam o desenvolvimento da agricultura tropical e que nos permitam alcançar elevados níveis de produtividade sem que tenhamos que recorrer exclusivamente aos estoques de nutrientes absorvidos e assimilados ao longo de séculos pelas florestas. Precisamos explorar ao máximo a capacidade das plantas de usar energia radiante para gerar e armazenar energia química sem precisar recorrer à degradação dos nossos solos.

PREFÁCIO

PREFÁCIO

Neste Congresso de Ciências do Solo está sendo lançado o livro: SOLOS DO MARANHÃO: GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO E PEDOMETRIA

Este livro reúne o conhecimento de dezenas de pesquisadores e cientistas que aliam rigorosa formação científica com vasta experiência profissional, não apenas sobre os solos do Maranhão em seu contexto natural, formação geológica, sua morfologia e os efeitos do clima e da vegetação sobre sua variação, mas também sobre a interação desses fatores ao longo do tempo, o que resulta na grande variabilidade desses solos.

Esses estudos mostram que, a diversidade que se observa no estado do Maranhão evidencia a estreita relação entre os processos pedogenéticos e as particularidades geoambientais e climáticas do Maranhão. Os conhecimentos obtidos nos processos de geração desses dados serão essenciais para o desenvolvimento de programas sobre segurança alimentar, modelos de ciclagem de nutrientes, acúmulo e ciclagem de carbono no solo, e no conjunto, para a manutenção da biodiversidade e manutenção dos nossos ecossistemas.

Com grande atraso, mas com grande determinação, caminharemos para substituir o modelo de usar as florestas como fonte de nutrientes para a agricultura, por um sistema de conservação e desenvolvimento com maior capacidade de aporte de nutrientes a partir do maior conhecimento dos nossos solos, possibilitando um desenvolvimento da agricultura tropical, alicerçado em bases científicas sólidas.

Dr. Manlio Silvestre Fernandes

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Agradecemos também a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Código de Financiamento 001.

A FAPEMA – Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão.

A FAPERJ - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FINEP/CT-AGRO/FNDCT/MCTI (Convênio 01.22.0081.00 e SEG. 20.23.00.114.00.00 - Projeto PronaSolos: Rede para o avanço científico e tecnológico aplicado às múltiplas funcionalidades do solo para o desenvolvimento agroambiental do Brasil.)

Os autores agradecem ao projeto MapBiomias Solo pelo apoio na realização deste trabalho.

LISTA DE TABELAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 1 – Principais períodos climáticos da Terra e sua relevância para os solos brasileiros.....	44
Tabela 2. Processos pedogenéticos associados às classes de solo no Maranhão.....	49
Tabela 3. Classificação Climática com base no Índice de Aridez (IA).....	50
Tabela 4. Níveis de suscetibilidade à desertificação com base no IA.....	52
Tabela 5 - Categorias e classificação do SPI. Adaptado de McKee et al. (1993).....	59
Tabela 6. Redistribuição das classes do Índice de Aridez no Maranhão segundo cenários de mudanças climáticas.....	64
Tabela 7. Projeção da suscetibilidade à desertificação no Maranhão segundo cenários de mudanças climáticas.....	66

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Distribuição da fauna edáfica em grupos funcionais e serviços ecossistêmicos.....	87
---	----

CAPÍTULO 8

Tabela 1. Estatísticas de validação por camada de solo (%) – n = 404 camadas de 235 perfis de solo.....	198
Tabela 2. Estatísticas de validação médias por perfil de solo (%) – n = 235 perfis de solo.....	198

CAPÍTULO 9

Tabela 1. Comparação entre as tecnologias SAR e LiDAR em aplicações em solos do ambiente urbano, agrícola e em formações florestais.....	218
--	-----

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1: Mapa geológico do Estado do Maranhão, com a divisão dos domínios tectônicos (simplificado de Klein; Sousa, 2012).....	2
Figura 2: Coluna litoestratigráfica da Bacia do Parnaíba (adaptada de Vaz <i>et al.</i> ,2007).....	6
Figura 3: aspecto dos arenitos com estratificação cruzada e plano-paralela (BR-230 próximo a São João dos Patos).....	7
Figura 4: Aspectos dos siltitos intercalados com níveis de silexitos da Formação Pedra de Fogo (cidade de Timom).	8
Figura 5: Aspectos dos arenitos eólicos da Formação Sambaíba (BR-010, próximo de Carolina).....	9
Figura 6: Lajeiros de basaltos da Formação Mosquito (Rio Clementino, Ribamar Fiquene)	10
Figura 7: Arenitos eólicos da Formação Corda (BR-135, próximo de Colinas)11	
Figura 8: Folhelhos variegados intercalados com arenitos de ambiente fluvial do Grupo Itapecuru (BR-135, próximo de Peritoró).....	12
Figura 9: arenitos intercalados com níveis argilosos (falésia da praia da Baronesa-Alcantara).....	14
Figura 10: arenitos intercalados com folhelhos da Formação Cujupe (Porto Cujupe).	14
Figura 11: Falésia na Praia do Panaquatira com horizontes bem desenvolvidos das Lateritas Maturas.	15
Figura 12: (A) sedimentos arenosos avermelhados (Pós-Barreiras 1) e dunas eólicas da Unidade Depósitos Litorâneos no topo (São Luís, Av. Litorânea); (B) sedimentos arenosos ocre, inconsolidados (Pós-Barreiras 2) (Praia do Panaquatira- São Luís).....	17
Figura 13: areias inconsolidadas dos Depósitos Fluviolagunares (cidade de Viana-MA).	18
Figura 14: Aspecto das dunas eólicas dos Depósitos Eólicos Litorâneos (campo de duas dos Lençóis Maranhenses).....	19
Figura 15: Areias e argilas dos Depósitos Aluvionares (rio Pindaré-cidade de Viana).....	20

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Mapa do relevo do Maranhão.	32
Figura 2. Mapa dos domínios geomorfológicos do Maranhão.....	35
Figura 3. Mapa das Bacias hidrográficas do Maranhão.....	38

CAPÍTULO 3

Figura 1. Espacialização do Índice de Aridez (IA) no estado do Maranhão.....	51
Figura 2. Espacialização da suscetibilidade à desertificação no Maranhão...	53
Figura 3. Regionalização de cenários climáticos de temperatura do ar (°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).....	57
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).....	58
Figura 5. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Cândido Mendes (clima equatorial).....	61
Figura 6. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Grajaú (clima semiárido).....	62
Figura 7. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Imperatriz (clima tropical).	63
Figura 8. Projeção do Índice de Aridez (IA) no Maranhão até 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.....	64
Figura 9. Projeção da suscetibilidade à desertificação no Maranhão em 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.	65

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 4

- Figura 1. Fitofisionomias do Maranhão. A. Floresta Ombrófila Densa. B. Cerrado. C. Mata ciliar. D. Campinarana. E. Manguezal. F. Restinga. G. Dunas. H. Mata de cocais. Fotos por L. Marinho, exceto B por R. Saraiva. 75
- Fig. 2. Fungos decompositores e micorrízicos com ocorrência no Maranhão. A-*Geastrum* sp.; B-*Hygrocybe* sp.; C-*Mycena* sp.; D-*Clavularia* sp.; E-*Trametes* sp.; F-*Acaulospora* sp.; G-*Gigaspora* sp.; H-*Ambispora* sp. 90
- Figura 3. Terra preta de Índio (a) e sambaqui (b) no Maranhão..... 91
- Figura 4. Estacas do sítio de palafitas no lago Coqueiro, município de Olinda Nova do Maranhão, que ficaram aparentes na seca de 2012 (Alexandre Guida Navarro/UFMA). 92

CAPÍTULO 5

- Figura 1. Mapa de domínios tectônicos no Estado do Maranhão. 113
- Figura 2. Mapa de associações tectônicas no Estado do Maranhão. 114
- Figura 3. Mapa de detalhe das associações tectônicas do Fragmento Cratônico São Luís e do Cinturão Gurupi, no Estado do Maranhão 116

CAPÍTULO 6

- Figura 1. Representação esquemática dos processos pedogenéticos: 125
- Figura 2. Adição de resíduos culturais (a) e serapilheira (b) na superfície do solo. Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal). 126
- Figura 3. Perdas de solo por processos erosivos em encostas. Foto: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal). 128
- Figura 4. (a) Cerosidade propriedade morfológica resultante da deposição de argila na superfície de um torrão de solo e (b) Translocação de compostos orgânicos resultando no acúmulo de material orgânico em subsuperfície levando à formação de horizonte B espódico, observa-se o contraste entre os horizontes eluvial e iluvial. Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal). 129

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 5. (a) Cores mosqueadas decorrentes da redução e oxidação do ferro, levando a presença de plintita; (b) Mosqueamento devido a presença de jarosita..
Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal).132

CAPÍTULO 7

Figura 1. Mapa pedológico do estado do Maranhão. Fonte: Batistella et al. (2014). 136

Figura 2 - Distribuição espacial dos Argissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da..... 139

Figura 3 - Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo, em Axixá (a) e Argissolo Amarelo, em Anapurus (b), Maranhão. Fotos: Raimundo Carvalho Filho (in memoriam) (a) e Marlen Barros e Silva (b).140

Figura 4 - Perfil de Cambissolo Háplico, em Formosa da Serra Negra - Maranhão. Foto: Marcelino Silva Farias Filho..... 142

Figura 5 - Perfil de Chernossolos em Loreto, Maranhão (a) e São José dos Patos, Maranhão (b), e Chernossolo Rêndzico Lítico Fragmentário em Timon, Maranhão (c). Foto: Amanda Alves Sales (a) e (b) - Marcelino Silva Farias Filho (c) 144

Figura 6 - Perfil de Espodossolo Háplico, município de Icatu (a), e Espodossolo Hidromórfico em Morros (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu (a) e Marlen Barros e Silva (b). 145

Figura 7 - Distribuição espacial dos Gleissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da. 148

Figura 8- Perfil de Gleissolo Sáfico, município de Vitória do Mearim (MA). Foto: Sergio Hideiti Shimizu..... 149

Figura 9 - Distribuição espacial dos Gleissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.151

Figura 10 - Perfil de Latossolo Amarelo, em Balsas (a) e Latossolo Vermelho-Amarelo em São Raimundo das Mangabeiras (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.152

Figura 11- Perfil de Luvisolo Crômico, em São João dos Patos (a) e Luvisolo Háplico em Dom Pedro (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu..... 154

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 12 - Distribuição espacial dos Luvissoles no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.	156
Figura 13 - Distribuição espacial dos Neossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.	158
Figura 14 - Perfil de Nitossolo Vermelho, município de Campestre do Maranhão (MA) (a); cerosidade na superfície de um agregado estrutural em Nitossolo. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.	162
Figura 15 - Distribuição espacial dos Nitossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.	162
Figura 16 - Perfil de Planossolo Háplico, município de São Mateus do Maranhão (MA) (a); detalhe da transição abrupta entre os horizontes E e 2Btgcf. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.	164
Figura 17 - Distribuição espacial dos Plintossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.	166
Figura 18 - Perfil de Plintossolo Argilúvico (a), Plintossolo Pétrico (b) e Plintossolo Háplico (c), respectivamente, nos municípios de Itapecuru-Mirim, Igarapé do Meio e Santa Inês (MA). Fotos: Sergio Hideiti Shimizu (a) e Marlen Barros e Silva (b, c).	167
Figura 19 - Perfil de Vertissolo Háplico, município de Presidente Dutra (a) e Vertissolo Hidromórfico, município de Bacabeira (MA). Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.	169

CAPÍTULO 8

Figura 1. Fluxograma da modelagem preditiva do MDS.	178
Figura 2. Comparação entre o raciocínio inferencial (qualitativo) no mapeamento tradicional (A), baseado na interpretação visual e extrapolação entre observações, e no mapeamento digital de solos (B), baseado na modelagem de relações quantitativas entre atributos do solo e variáveis ambientais como declividade.	181

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados como dados de treinamento no mapeamento da granulometria do estado do Maranhão (n=489).....	189
Figura 4. Predição espacial das log ratio - razões entre areia e argila (A) e areia e silte (B).....	196
Figura 5. Predição espacial do teor de silte (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).....	196
Figura 6. Predição espacial do teor de argila (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).....	197
Figura 7. Predição espacial do teor de areia (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).....	197
Figura 8. Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados como dados de treinamento no mapeamento de classes de solo do estado do Maranhão (n=364).	200
Tabela 3. Simbologia das classes de solos no 2º nível categórico do SiBCS e distribuição do número de perfis de solo e pseudo-amostragens de cada classe de solo das 364 observações utilizadas na predição e mapeamento das classes de solo do estado do Maranhão.....	201
Figura 9. Probabilidade de ocorrência de cada classe de solo. A) Argissolo Amarelo, B) Argissolo Vermelho, C) Argissolo Vermelho-Amarelo, D) Espodossolo, E) Gleissolo Háptico, F) Latossolo Amarelo, G) Plintossolo Argilúvico, H) Plintossolo Háptico, I) Neossolo Litólico, J) Neossolo Flúvico, K) Neossolo Quartzarênico...	203
Figura 10. Predição e mapeamento de classes de solos do estado do Maranhão (A) e mapa de incertezas associadas - índice de confusão (B).....	204
Tabela 4 - Acurácia por classe de solo (AC) e Acurácia global (AG) na validação cruzada.	205

CAPÍTULO 9

Figura 1. Esquema ilustrativo dos princípios do SR.....	211
Figura 2. Alguns métodos (não ópticos) e tipos de sensoriamento remoto em medições de solo. Fonte: Abdurraheem et al. (2023).....	214

SUMÁRIO

SUMÁRIO

SEÇÃO 1 - CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO E DOS SOLOS DO MARANHÃO

CAPÍTULO 1..... 1

GEOLOGIA DO ESTADO DO MARANHÃO
ELEM CRISTINA DOS SANTOS LOPES

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519091>

CAPÍTULO 2..... 29

RELEVO, ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS NA FORMAÇÃO DOS SOLOS DO MARANHÃO
GLÉCIO MACHADO SIQUEIRA

[Leonardo Gonçalves de Lima](#)

[Guilherme Domingues Ferreira](#)

[Eduardo Carvalho da Silva Neto](#)

[Marcos Gervasio Pereira](#)

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519092>

CAPÍTULO 3..... 42

CLIMA COMO FATOR NA FORMAÇÃO DO SOLO: CENÁRIOS CLIMÁTICOS E PEDOGÊNESE NO MARANHÃO
GUNTER DE AZEVEDO RESCHKE

[Carlos Wendell Soares Dias](#)

[Carlos Marcio de Aquino Eloi](#)

[Márcio Roberto Bezerra Fialho](#)

[Claudia Klose Parise](#)

[Wesley Lima Barbosa](#)

[Mayara Rodrigues Nascimento](#)

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519093>

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 4 72

ORGANISMOS: ECOSSISTEMAS DO MARANHÃO E COMPOSIÇÃO DA PAISAGEM

GLÉCIO MACHADO SIQUEIRA

Aldair de Souza Medeiros

Guilherme Domingues Ferreira

Lucas Cardoso Marinho

Lailda Brito Soares

Mizalene Silva da Silva

Raysa Valéria Carvalho Saraiva

Camila Pinheiro Nobre

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519094>

CAPÍTULO 5..... 110

TEMPO NA FORMAÇÃO DOS SOLOS DO MARANHÃO: EVOLUÇÃO GEOLÓGICA, ESTABILIDADE/REJUVENESCIMENTO E PEDOCRONOLOGIA

EDUARDO CARVALHO DA SILVA NETO1

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519095>

CAPÍTULO 6 124

PROCESSOS PEDOGENÉTICOS MÚLTIPLOS

MARLEN BARROS E SILVA

Marcos Gervasio Pereira

Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Glécio Machado Siqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519096>

CAPÍTULO 7..... 135

CLASSES DE SOLOS DO ESTADO DO MARANHÃO

MARCOS GERVASIO PEREIRA

Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Marlen Barros e Silva

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Glécio Machado Siqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519097>

SUMÁRIO

SUMÁRIO

SEÇÃO 2 - PEDOMETRIA APLICADA: MAPEAMENTO DIGITAL E SENSORIAMENTO REMOTO

CAPÍTULO 8.....175

MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DO MARANHÃO: FUNDAMENTOS, BOAS PRÁTICAS E EXEMPLOS DE MAPEAMENTO DE CLASSES E ATRIBUTOS

TACIARA ZBOROWSKI HORST

[Maria de Lourdes Mendonça-Santos](#)

[Jean Michel Moura-Bueno](#)

[Alessandro Samuel-Rosa](#)

[Ana Caroline Pretto](#)

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519098>

CAPÍTULO 9 211

SENSORIAMENTO REMOTO PARA A GESTÃO DO SOLO: UMA PROPOSTA PARA AMBIENTES URBANOS, AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO ESTADO DO MARANHÃO

DENILSON DA SILVA BEZERRA

[Felipe Martins Sousa](#)

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412519099>



SEÇÃO

1

**CARACTERIZAÇÃO DO
MEIO FÍSICO E DOS SOLOS
DO MARANHÃO**



C A P Í T U L O 1

GEOLOGIA DO ESTADO DO MARANHÃO

Elem Cristina dos Santos Lopes

Pesquisadora - Serviço Geológico do Brasil

A geologia do Estado do Maranhão é predominantemente composta por rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, no extremo noroeste do estado afloram pequenas porções de rochas ígneas e metamórficas. Essas pequenas janelas são denominadas de Fragmento Cratônico São Luiz (Klein et al., 2008 e Cinturão Gurupi (Klein et al., 2005a). Para o melhor entendimento da geologia do Maranhão este será subdividido em domínios tectônicos, onde são agrupadas as rochas com base em critérios como idade, tipologia, ambiente de formação/deposição e significado tectônico.

O Domínio das Rochas Pré-Cambrianas é onde estão agrupadas as rochas mais antigas, a consolidação dos primeiros grandes continentes, passando de um regime tectônico de pequena para grandes placas tectônicas com intensa movimentação vertical e horizontal. O Domínio das Bacias Sedimentares Fanerozoicas é onde ocorrem as grandes mudanças na superfície terrestre, são agrupadas as rochas onde se registra a grande explosão e adaptação de fauna e flora, com a formação de paleo supercontinentes e grandes mares epicontinentais. O Domínio das Coberturas Superficiais Cenozoicas é a fase das grandes transgressões e regressões marinhas, com forte intemperismo das rochas pré-cambrianas e paleozoicas, e mantém uma configuração dos continentes até os dias atuais.

1. DOMÍNIOS TECTÔNICOS DO ESTADO DO MARANHÃO

1.1. Domínio das Rochas Pré-Cambrianas

No extremo noroeste do estado afloram pequenas porções de rochas pré-cambrianas, como janelas tectônicas e erosivas, em meio à cobertura sedimentar (Figura 1). Essas janelas são divididas em duas associações: Fragmento Cratônico São Luís e Cinturão Gurupi.

- Fragmento Cratonico São Luís

Foi designado por Klein et al. (2008) e faz parte de um orógeno maior, localizado no Cráton oeste Africano, com evolução no Riáciano (entre 2.240 e 2.050 Ma). Esta associação tectônica é composta por rochas metavulcanossedimentares e rochas vulcânicas que constituem as bacias de arcos de ilha e/ou magmáticos, e por conjuntos de granitoides que se distribuem nas suítes plutônicas pré-, sin- e pós-colisionais (Klein et al., 2008; 2009). Esta associação tectônica está dividida nas seguintes unidades geológicas: Grupo Aurizona, Granófiro Piaba, Suíte Intrusiva Tromai, Suíte Intrusiva Rosário, Unidade Vulcânica Serra do Jacaré, Formação Rio Diamante, Granito Negra Velha e Unidade Vulcânica Rosilha.

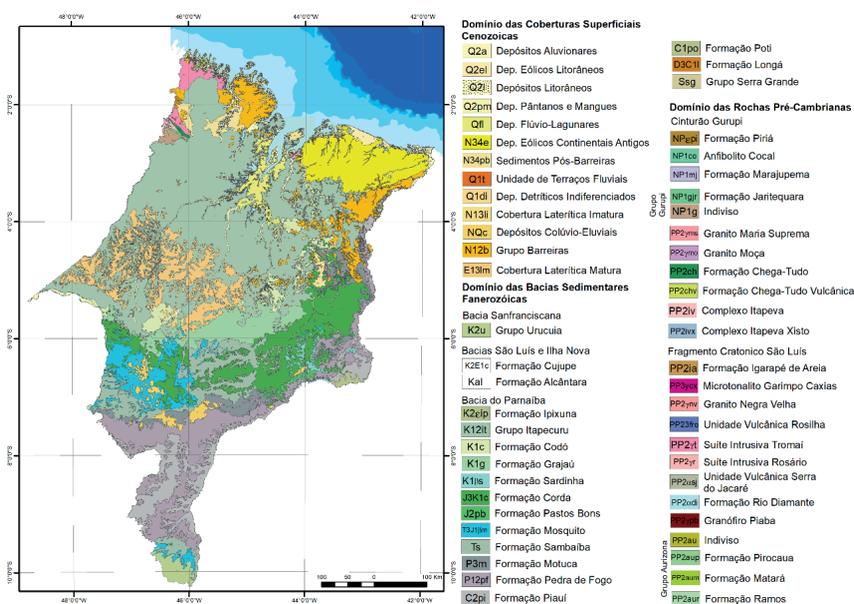


Figura 1: Mapa geológico do Estado do Maranhão, com a divisão dos domínios tectônicos (simplificado de Klein; Sousa, 2012).

O Grupo Aurizona é formado por rochas metavulcanossedimentares, originadas em arco de ilhas (Klein, 2004), com idade de 2.240 ± 5 Ma (Klein; Moura, 2001), que aparece indiviso no mapa devido a escala. Este conjunto litológico aflora desde o norte da vila Areal até a porção a nordeste da cidade de Luís Domingues. Klein et al. (2008) propuseram a subdivisão do grupo em três formações denominadas Matará, Pirocaua e Ramos.

A Formação Matará é composta por rochas metavulcânicas básicas e ultrabásicas, com xistosidade e coloração cinza-escuro a preto, com tons esverdeados frequentes. A Formação Pirocaua engloba um conjunto de rochas piroclásticas e vulcânicas ácidas metamorfizadas, como metatufo félsico/riolítico, tufo cinerítico e aglomerados vulcânicos. A Formação Ramos são rochas metassedimentares como quartzito (puro, ferruginoso ou manganífero), xistos com quartzo e/ou muscovita e/ou clorita, filito, filito grafitoso, metachert puro ou ferruginoso ou grafitoso, metarenito e grauvaca lítica.

O Granófiro Piaba é composto por granitoides finos com textura granofírica e composição granodiorítica a tonalítica que intrudem e assimilam parcialmente a sequência do Grupo Aurizona, e apresentam idade de 2.214 ± 3 Ma (Klein et al., 2008).

A Unidade Vulcânica Serra do Jacaré foi informalmente definida por Klein et al. (2008) para descrever as seguintes rochas vulcânicas e subordinadas rochas vulcanoclásticas de composição ácida a predominantemente intermediária: dacito pórfiro, andesito/basalto, tufo e brecha vulcânica. Esta unidade possui idade de 2.164 ± 3 Ma.

A Suíte Intrusiva Tromai é um conjunto vulcano-plutônico constituído por tonalitos, trondhjemitos, granodioritos, granitos, quartzo-andesitos, riolitos e dacitos. As idades variam entre 2.147 ± 3 a 2.168 ± 4 Ma (Klein; Moura, 2001; Klein et al., 2005a, 2008; Klein; Lopes, 2011).

A Suíte Intrusiva Rosário é um conjunto de granitoides que aflora em uma pequena janela ao sul da Ilha de São Luís. Gorayeb et al. (1999) descreveram tonalitos e granodioritos, e possuem características similares à Suíte Intrusiva Tromai. Idades com erros analíticos relativamente altos variam de 2.079 ± 48 Ma a 2.139 ± 22 Ma.

A Formação Rio Diamante é predominantemente constituída de derrames e secundariamente depósitos vulcanoclásticos compostos por riolito, dacito e tufo dacítico, com idade de 2.160 ± 8 Ma (Klein et al., 2009).

O Granito Negra Velha (Klein et al., 2008), por sua vez, é predominantemente constituída composto por monzogranito, ocorrendo também sienogranito e quartzo-monzonito. Dados geocronológicos (Klein et al., 2008), embora pouco precisos, indicam claramente que a intrusão do Granito Negra Velha ocorreu entre 2.056 e 2.076 Ma.

Klein et al. (2008) denominaram a Unidade Vulcânica Rosilha, e são descritos riolitos, dacitos, tufos líticos e de cristal. Klein et al. (2009) em uma tentativa preliminar de datação desta unidade obtiveram idades entre 1.920 ± 9 Ma e 2.068 ± 7 Ma.

Klein et al. (2008) cartografaram o corpo denominado de Microtonalito Garimpo Caxias, que é uma rocha equigranular e maciça, possui cor cinza azulada ou esverdeada, quando afetado por hidrotermalismo em larga escala. Klein et al. (2002) determinaram idade de 1.985 ± 4 Ma para esta unidade.

A Formação Igarapé de Areia, definida por Abreu et al. (1980), compõe-se de arenitos depositados sobre a Formação Chega Tudo que devido a processos tectônicos foram juntamente deformadas, originando metarenitos (Klein; Lopes, 2014). Teixeira et al. (2007) relataram idades maiores do que 2.110 Ma.

- Cinturão Gurupi

A designação Cinturão é dada a uma faixa estreita e alongada de idade neoproterozoica (< 1100 Ma) que fica na borda sul-sudeste do Cráton São Luís, de orientação NNW-SSE (Almeida et al., 1976), caracterizada por um conjunto de rochas metamórficas e ígneas formadas a partir da colisão de duas placas tectônicas pretéritas. Este Cinturão apresenta fragmentos retrabalhados do Cráton São Luís e de porções do embasamento sobre o qual as rochas do Cinturão se desenvolveram. O Cinturão Gurupi é composto pelo Complexo Itapeva, Formação Chega Tudo, Formação Igarapé de Areia, Granito Maria Suprema, Granito Moça, Grupo Gurupi (Formação Jaritequara), Formação Marajupema, Anfíbolito Cocal e Formação Piriá.

O Complexo Itapeva, definido por Klein et al. (2005a), é composto por rochas ígneas (tonalitos e granodioritos) metamorfizadas gerando gnaisses, às vezes são identificados xistos grossos derivados de rochas sedimentares, chamados de Itapeva Xisto (Klein; Lopes, 2014). Estas rochas têm idade 2.167 ± 2 Ma (Klein et al., 2005b).

A Formação Chega Tudo definida por Abreu et al. (1980) e Klein et al. (2005b) é formada pela alternância de variadas rochas vulcânicas (ígneas) como dacitos, andesitos e tufos com rochas sedimentares que foram metamorfizadas e datadas com idade entre 2.148 ± 1 e 2.160 ± 3 Ma (Klein; Moura, 2001).

O Granito Maria Suprema, definido por Pastana (1995), é formado por pequenos corpos de muscovita granito intrusivos no Complexo Itapeva e possui de idade de 2.100 ± 12 Ma (Klein; Moura, 2001).

O Granito Moça foi definido por Klein e Lopes (2011) para designar corpos de granitos (sienogranito e monzogranito) intrusivos no Complexo Itapeva, com idade de 2.099 ± 19 Ma (Klein; Lopes, 2014).

A Formação Jaritequara (Grupo Gurupi), definida por Costa et al. (1996), é composta por sedimentos finos de uma bacia marinha marginal que foram metamorfizados gerando xistos micáceos e quartzosos (Costa e Ricci, 2000).

A Formação Marajupema, definida por Pastana (1995) e reclassificada por Klein et al. (2005a), engloba arenitos depositados em margem continental que, metamorfizados, geraram um quartzito feldspático (Klein, 2004), com idade variando de 2.635 Ma a 1.100 Ma (Klein et al., 2005a), indicando que rochas de idades variadas foram fontes para estas rochas. Outra porção indivisa do Grupo Gurupi composta por xistos alterados, sem identificação de seu protólito, ígneo ou sedimentar, foi cartografada por Klein e Lopes (2014).

O Anfibolito Cocal definido por Klein e Lopes (2011), corresponde a anfibolitos cinza-escuros e cinza-esverdeados, com idade de 1 Ga (Klein; Lopes, 2014).

A Formação Piriá (Abreu et al., 1980) é composta por arenitos arcoseanos, pelitos, na porção basal por conglomerados e, subordinadamente grauvas e subarcóseos (Truckenbrodt et al., 2005). Lopes et al. (2016) atribuem esta formação a um ambiente fluvial, incluindo leques aluviais, planície de inundações e canais fluviais. Para Lopes et al. (2016), a idade da sedimentação da unidade basal (conglomerados) da Formação Piriá é de 1.500 Ma e para a porção superior a idade máxima de sedimentação é de 591 Ma.

1.2. Domínio das Bacias Sedimentares Fanerozoicas

Este domínio ocupa 98% do estado do Maranhão, englobando as Bacias do Parnaíba, Sanfranciscana e São Luís. A evolução destas Bacias como uma sinéclise ocorreu durante o Paleozoico (Bacia do Parnaíba), mas se estendeu até o Mesozoico (Bacias Sanfranciscana e São Luís), com registros de sedimentação e magmatismo entre o Triássico e Cretáceo.

A subsidência e deposição dos sedimentos na ampla depressão intracratônica da Bacia do Parnaíba iniciou no final do Ordoviciano e começou do Siluriano (Góes et al., 1993), dando início a primeira sequência sedimentar da bacia.

- Bacia do Parnaíba

Esta bacia é composta por 5 grandes sequências sedimentares: Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica-Eocretácea (formações Pastos Bons e Corda) e Cretácea (formações Grajaú, Codó, Ipixuna e Grupo Itapecuru) (Figura 2). Intercaladas ou cortando estas sequências sedimentares ocorrem rochas básicas toleíticas triássico-jurássicas da Formação Mosquito e cretáceas da Formação Sardinha.

- Sequência Siluriana (Grupo Serra Grande)

O Grupo Serra Grande (Carozzi, 1975), com idade entre 443 a 416 milhões de anos (Período Siluriano), é composto pelas rochas das Formações Ipú, Tianguá e Jaicós. Caputo e Lima (1984) incluíram o Arenito Guamá como fácies distal da Formação Ipu, mas somente uma área pequena (0,025%) deste grupo aflora no noroeste do estado do Maranhão sobre as rochas do Fragmento Cratonico São Luís, sem a subdivisão em outras unidades. É tratado como Grupo Serra Grande Indiviso no mapa, e é composto por quartzo-arenitos esbranquiçados, maciços, indicativo de fácies proximal (Klein e Lopes, 2011).

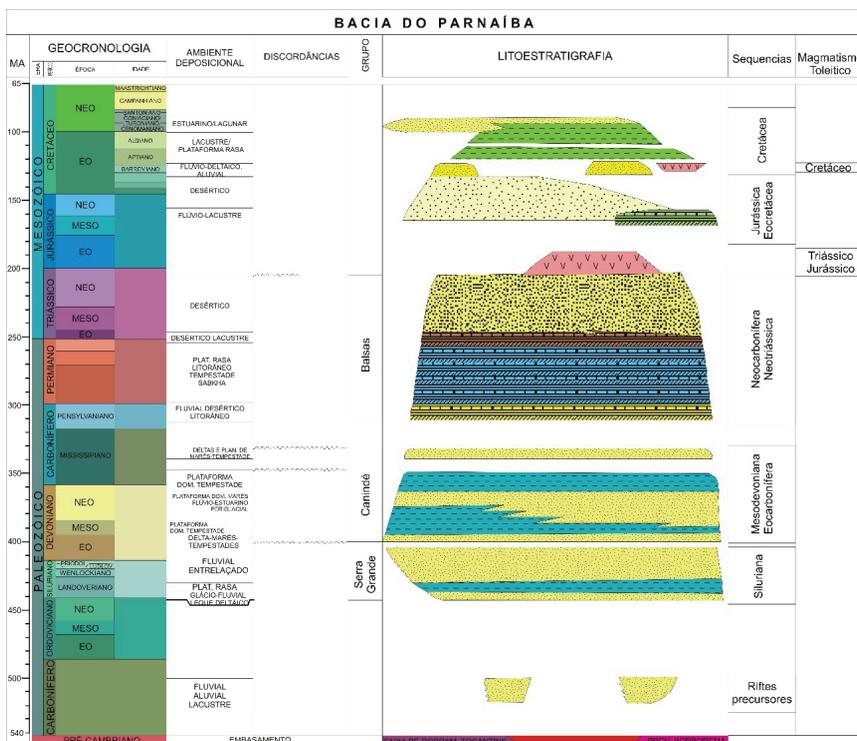


Figura 2: Coluna litoestratigráfica da Bacia do Parnaíba (adaptada de Vaz et al., 2007).

- Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé)

As rochas do Grupo Canindé possuem idade de 374 milhões de anos (Período Devoniano) a 345 milhões de anos (Período Carbonífero) (Lima e Leite, 1978; Melo et al., 1998; Loboziak et al., 2000). As unidades que compõem este grupo são as formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti; porém somente as formações Longá e Poti afloram em pequenas áreas do nordeste e oeste do estado do Maranhão.

A Formação Longá é constituída por folhelhos cinza-escuros, pretos a roxos; siltitos argilosos; arenitos e siltitos cinza-claros a esbranquiçados (Lima e Leite, 1978), depositados em ambiente costeiro–deltaico dominado por ondas e tempestades (Lobato e Borghi, 2007).

A Formação Poti é composta por arenitos cinza esbranquiçados, beges (Figura 3), com intercalações de siltito cinza claro e por arenitos finos a médios, cinzas, com camadas de siltitos e folhelhos carbonosos (Lima e Leite, 1978). Estas rochas foram depositadas em ambiente de origem marinha, de água rasas, ambiente fluvial e ambiente fluvio-deltaico, com influência marinha (Lima e Leite, 1978). De acordo com Melo e Loboziak (2000) esta formação tem idade variando de 345 a 326 milhões de anos (Período Carbonífero).



Figura 3: aspecto dos arenitos com estratificação cruzada e plano-paralela (BR-230 próximo a São João dos Patos).

- Sequência Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas)

O Grupo Balsas, nome proposto por Góes *et al.* (1993) e Rossetti *et al.* (1989) para reunir rochas clástico-evaporíticas, é composto pelas rochas das formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba. Estas formações afloram na porção central e sul do estado do Maranhão.

A Formação Piauí (Duarte, 1936) é composta por arenitos com intercalações de siltitos e argilitos, e folhelhos contendo intercalações lenticulares de calcário de origem marinha (Lima; Leite, 1978). O ambiente deposicional desta Formação é fluvial, com contribuição eólica, clima semiárido a desértico, com breves incursões marinhas (Lima e Leite, 1978). De acordo com os trabalhos de Muller (1962) estas rochas possuem idade variando de 318 a 299 milhões de anos.

A Formação Pedra de Fogo (Plummer, 1946), é composta por uma variedade de rochas como siltitos, folhelhos, calcários e silexitos (Figura 4), depositados em ambiente marinho raso a litorâneo, com planícies do tipo sabkha, sob ocasional influência de tempestades (Góes e Feijó, 1994). Esta formação possui idade entre 299 a 253 milhões de anos segundo Dino *et al.* (2002).



Figura 4: Aspectos dos siltitos intercalados com níveis de silexitos da Formação Pedra de Fogo (cidade de Timom).

A Formação Motuca (Plummer *et al.*, 1948), aflorante nas porções centro-sul e sudeste-este do estado do Maranhão, engloba siltitos, arenitos e subordinadamente folhelhos, depositados num sistema desértico, com lagos associados (Góes; Feijó, 1994). Esta unidade possui idade variando de 253 a 251 milhões de anos.

A Formação Sambaíba (Plummer *et al.*, 1948) é uma sequência de arenitos avermelhados (Figura 5) e esbranquiçados, depositados em ambiente continental desértico com contribuição fluvial (Lima e Leite, 1978). Aflorante principalmente no extremo sudeste e região central do estado do Maranhão, com idade variando de 251 a 199 milhões de anos (Klein e Sousa, 2012).

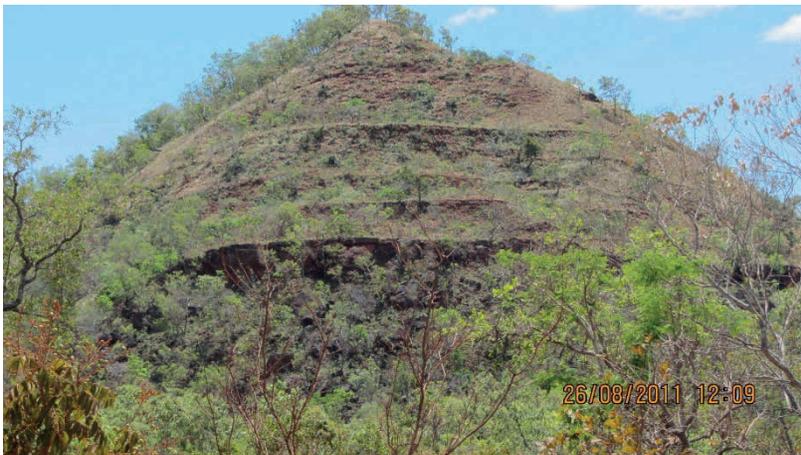


Figura 5: Aspectos dos arenitos eólicos da Formação Sambaíba (BR-010, próximo de Carolina).

- Magmatismo Toleítico Triássico-Jurássico

A primeira referência a rochas básicas na Bacia do Parnaíba é de Lisboa (1914). O primeiro evento ocorreu no limite Triássico-Jurássico (200-190 Ma), corresponde à Formação Mosquito e estaria relacionado à abertura do Oceano Atlântico Equatorial e Norte (Marzoli et al., 1999). O segundo evento (130-120 Ma) corresponderia à Formação Sardinha, limitada à porção leste da Bacia do Parnaíba (Piauí e Maranhão) e relacionada à abertura do Oceano Atlântico Sul (Marzoli et al., 1999; Milani e Zalán, 1999).

A Formação Mosquito (Aguiar, 1971) é constituída por derrames basálticos aflorantes principalmente na região centro-oeste do estado do Maranhão (Figura 6) que ocorrem em faixas descontínuas, geralmente alinhadas nas direções E-W e NE-SW. Os basaltos são de coloração cinza-escura a marrom-avermelhada, maciços, com textura afanítica a microporfirítica e em algumas regiões mostram estruturas vesiculares e amigdaloidais preenchidas por zeólita, carbonato e esmectita (Lima e Leite, 1978; Costa Neto et al., 2012).



Figura 6: Lajeiros de basaltos da Formação Mosquito (Rio Clementino, Ribamar Fiquene)

- Sequência Jurássica-Eocretácea (formações Pastos Bons e Corda)

Esta sequência é composta pelas formações Pastos Bons (Lisboa, 1914; Lima e Leite, 1978) e Corda (Campbell, 1949). A Formação Pastos Bons é aflorante em áreas contínuas na região centro-oeste do estado do Maranhão, estendendo-se desde São Domingos do Azeitão e Pastos Bons até norte de Buriti Bravo. É composta, na seção inferior, por conglomerados polimíticos com seixos de sílex e quartzo, arenitos esverdeados, amarelo-pálidos e esbranquiçados e argilosos. Em alguns locais como Buriti Bravo e Barro Duro, ocorrem camadas lenticulares de calcário. A seção superior é constituída predominantemente de arenitos róseos a avermelhados, siltitos argilosos arroxeados a marrom-avermelhados e folhelhos cinza e esverdeados, calcíferos e fossilíferos (Lima e Leite, 1978). Os sedimentos são de ambiente lacustrino, com contribuição fluvial, e foram depositados em clima semiárido a árido em depressões continentais entre os altos dos derrames basálticos (Lima e Leite, 1978).

A Formação Corda aflora em uma faixa relativamente contínua na porção central do estado do Maranhão, estendendo-se de leste a oeste do estado, sendo constituída predominantemente por arenitos (Figura 7) e, subordinados, argilitos e folhelhos. O ambiente deposicional desta unidade é interpretado como sistema desértico (Vaz et al., 2007) com contribuição lacustre interdunas e fluvial (Caputo, 1984; Rezende, 2002). Segundo Santos e Carvalho (2009), a idade deposicional desta unidade é do Jurássico Superior até o Eocretáceo (Buracica).



Figura 7: Arenitos eólicos da Formação Corda (BR-135, próximo de Colinas)

- Sequência Cretácea (formações Grajaú, Codó, Grupo Itapecuru e Formação Ipixuna)

Esta é a última sequência deposicional da Bacia do Parnaíba composta pelas formações Grajaú (Aguiar, 1971), Codó (Mesner e Wooldridge, 1964), Grupo Itapecuru (Campbell, 1949; Rossetti, 1996; Rossetti e Truckenbrodt, 1997) e Formação Ipixuna (Francisco et al., 1971).

A Formação Grajaú aflora ao longo da região central do estado do Maranhão, ao norte da estrutura Arco Xambioá-Teresina, sendo constituída essencialmente de arenitos esbranquiçados a amarelo-pálidos. Intercalam-se aos arenitos, raras camadas de argilitos vermelhos, arroxeados, marrons e amarelo-pálidos. Na seção basal, ocorre conglomerado polimítico com seixos de quartzo, silexito, arenito silicificado, basalto e material proveniente do retrabalhamento de litologias da Formação Corda. De origem fluvio-deltaica e eólica, de acordo com Mesner e Wooldridge (1964) e Lima e Leite (1978), esta Formação é considerada do Aptiano/Albiano por sua relação de contemporaneidade com a Formação Codó (Lima e Leite, 1978; Rezende, 2002; Vaz et al., 2007). Costa Neto et al. (2012), entretanto, colocam a Formação Grajaú no intervalo Barremiano/Aptiano, baseados na relação estratigráfica com a Formação Corda.

A Formação Codó foi subdividida em três associações de fácies, que sugerem deposição em sistema predominantemente lacustre (Lima e Leite, 1978; Paz e Rossetti, 2001). A seção inferior é composta por arenitos calcíferos, cinza-claros a esbranquiçados, com intercalações de folhelhos e siltitos argilosos. A seção média

possui gipsita e calcários, às vezes do tipo coquina de ostracoda, e folhelhos cinza e escuros. A seção superior é iniciada por arenitos finos a conglomeráticos, calcíferos, micáceos e piritosos. Os dados palinológicos de Lima et al. (1980) indicaram idade Alagoas Superior (EoAlbiano). A análise palinológica feita por Rossetti e Góes (2004), na região de Codó, registrou duas unidades com idades distintas: a Unidade Inferior, possui idade Neoptiana e a Unidade Superior, idade Meso/Neoalbiana.

O Grupo Itapecuru representa um conjunto de formações compostas por variados tipos de rochas como arenitos, argilitos, siltitos e folhelhos intercalados com arenitos (Figura 8) depositados em vários ambientes como fluviais, deltaicos e lagunares (Lima e Leite, 1978; Gonçalves e Carvalho, 1996; Anaisse Júnior, 1999), com idade variando do Albiano ao Cenomaniano (Cretáceo Superior) (Rossetti et al., 2001). Essa variedade de rochas não pôde ser individualizada no mapa geológico e ocupa toda a porção centro-norte do estado do Maranhão.



Figura 8: Folhelhos variegados intercalados com arenitos de ambiente fluvial do Grupo Itapecuru (BR-135, próximo de Peritoró).

A Formação Ipixuna (Francisco et al., 1971) aflora desde 60 km ao sul de São Miguel do Guamá (PA) até 31 km ao norte de Imperatriz (MA). É composta por arenitos brancos, finos, caulínicos, e restritamente por siltitos e argilitos vermelhos, ritmitos de argilitos e arenitos brancos, e bancos de caulim. Estudos realizados na região do Rio Capim-PA, Santos Jr. (2002) reconheceu duas associações de fácies siliciclásticas atribuídas a ambientes deposicionais representativos de complexo fluvial e complexo estuarino. Quanto à idade, a unidade é posicionada no Cretáceo

Superior-Paleógeno Inferior, com base em estudos paleontológicos e correlação estratigráfica (Jupiassú, 1970; Santos Jr. e Rossetti, 2003; Santos Jr., 2006).

- Magmatismo Toleítico Cretáceo

A Formação Sardinha (Aguiar, 1971) é constituída por basaltos de ocorrência restrita no estado do Maranhão, aflorantes próximos à Aldeia Sardinha, a sudoeste da cidade de Barra do Corda e sudeste de Grajaú. A Formação Sardinha corresponde ao evento mais jovem da atividade ígnea toleítica da Bacia do Parnaíba, sendo contemporânea ao magmatismo da Bacia do Paraná (Góes et al., 1993). É composta por soleiras e diques de diabásio e mais raramente gabros. As idades dessas rochas variam de 149,5 a 87 Ma, com média de 124 Ma, de acordo com Vaz et al. (2007).

- Bacia Sanfranciscana (Sub-bacia Uruçuia)

A Bacia Sanfranciscana (Sgarbi, 1989) localiza-se no interior do Brasil sobre o Cráton do São Francisco, englobando grandes áreas dos estados de Minas Gerais e Bahia e pequenas partes de Goiás, Tocantins, Maranhão e Piauí.

O Grupo Uruçuia (Cretáceo) representa a unidade de maior distribuição regional da Bacia Sanfranciscana, mas no Maranhão aflora apenas no extremo sul do estado, onde se sobrepõe aos sedimentos da Bacia do Parnaíba (Lima e Leite, 1978; Campos e Dardenne, 1997). No mapa de geologia do Maranhão esse Grupo é abordado de forma indivisa, pois nunca foram descritas e formalizadas no estado do Maranhão. O grupo Uruçuia é composto pelas rochas cretáceas dos grupos Areado (formações Abaeté, Quiricó e Três Barras); Mata da Corda (formações Patos e Capacete) e Uruçuia (formações Posse e Serra das Araras).

- Bacias de São Luís e Ilha Nova

As Bacias de São Luís e Ilha Nova localizam-se no litoral noroeste do estado do Maranhão e constituem grábens desenvolvidos sobre o Fragmento Cratônico São Luís. Apenas as formações Cujupe e Alcântara (Grupo Itapecuru), pertencentes à Bacia de São Luís, afloram no noroeste do Maranhão, ao longo das falésias do litoral e em cortes de estradas (Rossetti e Truckenbrodt, 1997; Rossetti, 1998).

A Formação Alcântara (Cunha, 1968; Rossetti e Truckenbrodt, 1997), é constituída por arenitos, pelitos e, subordinadamente, por calcários e conglomerados. Aflora principalmente em falésias costeiras localizadas no município de Alcântara (Figura 9) e São Luís, ou em cortes de estrada situados nos trechos Pinheiro-Guimarães, Bacuritiba-Cajapió e Santa Inês-Bom Jardim (Rossetti, 1997). É considerada de idade eocenomaniana (Aguiar, 1971; Pedrão et al., 1994, 1996).

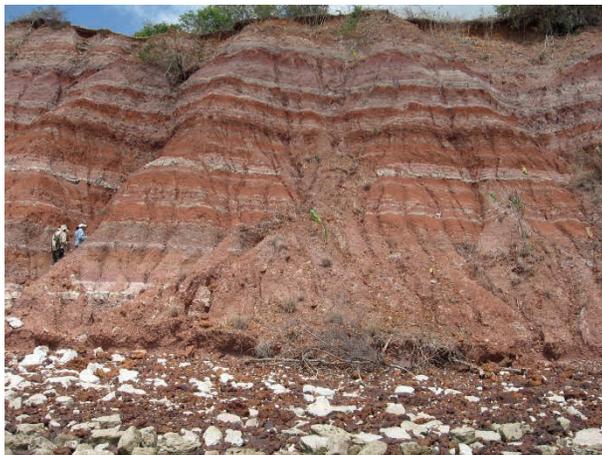


Figura 9: arenitos intercalados com níveis argilosos (falésia da praia da Baronesa – Alcântara).

A Formação Cujupe (Rossetti e Truckenbrodt, 1997) tem como área-tipo a estrada que liga a rodovia Pinheiro-Alcântara (MA-106) ao Porto de Cujupe (Figura 10). É composta litologicamente por arenitos caulínicos intercalados a argilitos e, subordinadamente, por conglomerados. A Formação Cujupe não possui registro fóssil (Santos e Carvalho, 2009) e considera-se que a deposição da mesma ocorreu em um tempo incerto entre o eocretáceo e o Paleógeno, com base no seu posicionamento estratigráfico (Rossetti, 1996; Rossetti e Truckenbrodt, 1997).



Figura 10: arenitos intercalados com folhelhos da Formação Cujupe (Porto Cujupe).

1.3. Domínio das Coberturas Superficiais Cenozoicas

As rochas deste domínio foram depositadas durante a expansão do Oceano Atlântico, num período aparentemente de calmaria, sem grandes eventos geológicos, porém evidenciam fase de aplainamento das superfícies antigas e marcam eventos climáticos importantes com grandes flutuações do nível do mar. Fazem parte deste domínio as Coberturas Lateríticas Matura, Grupo Barreiras, Depósitos Colúvio-Eluviais, Cobertura Laterítica Imatura, Depósitos Detríticos Indiferenciados, Unidade de Terraços Fluviais, Sedimentos Pós-Barreiras, Depósitos Eólicos Continentais Antigos, Depósitos Fluviolagunares, Depósitos de Pântanos e Mangues, Depósitos Litorâneos, Depósitos Eólicos Litorâneos, Depósitos Aluvionares.

As Coberturas Lateríticas Maturas (Costa, 1991) são as que apresentam um perfil laterítico completo, constituído da base para o topo pelos horizontes pálido ou transicional, argiloso, bauxítico e/ou fosfático e crosta ferruginosa (Figura 11). É relacionada à Superfície de Aplainamento Sul-Americana (King, 1956), do Cretáceo Superior ao Terciário Inferior. Geralmente define um relevo tabular, fortemente dissecado. No estado do Maranhão, esta unidade está bem representada na porção centro-oeste. Segundo Costa et al. (2005) os estágios finais de evolução do perfil laterítico ocorreram em torno de 26-24 Ma, com base em datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em hidróxidos de manganês e material argiloso esferolítico de lateritas da região do depósito de manganês do Azul (Serra dos Carajás-PA).



Figura 11: Falésia na Praia do Panaquatira com horizontes bem desenvolvidos das Lateritas Maturas.

O Grupo Barreiras é considerado a unidade geológica de ocorrência mais significativa do litoral brasileiro (Oliveira e Leonardos, 1943; Araújo et al., 2006). No estado do Maranhão, a unidade aflora no nordeste e noroeste e recobre discordantemente o Grupo Itapecuru. O Grupo Barreiras é composto litologicamente por arenitos mal selecionados, finos a grossos, variegados, em geral argilosos, com numerosas intercalações de folhelhos, além de fácies conglomeráticas. Trabalhos realizados nos estados do Pará e Maranhão comprovaram influência marinha na unidade. Considera-se que a sedimentação do Grupo ocorreu no intervalo que vai do Mioceno Inferior ao Plioceno (Oliveira e Silva, 2011; Arai, 2006; Rossetti e Góes, 2004; Rossetti, 2006).

Os Depósitos Colúvio-Eluviais (Rodrigues et al., 1994) abrangem os depósitos colúvionares e eluvionares, pois na escala do mapa não é possível mostrá-los separadamente. Localizam-se no topo dos platôs e chapadões, como resultado do intemperismo *in situ* das rochas, com pouco ou nenhum transporte significativo. São constituídos por areias finas, às vezes argilosas, e saprólito de arenitos, sem estruturas. A eluviação pode ter ocorrido desde o Neógeno até os dias atuais, necessitando de estudos mais detalhados sobre este processo.

Costa (1991) utiliza o termo Cobertura Laterítica Imatura para designar coberturas lateríticas formadas pelos horizontes pálido ou transicional, argiloso e ferruginoso, da base para o topo. Nesta unidade o horizonte bauxítico e/ou fosfático não ocorre, o que a diferencia da Cobertura Laterítica Madura. Sua área de ocorrência abrange as porções centro-leste e centro-oeste do estado, englobando áreas nos municípios de Esperantinópolis, Coroatá, Bacabal e Codó (centro-leste) e Grajaú (centro-oeste), dentre outros.

Os Depósitos Detríticos Indiferenciados (Costa Neto et al., 2012) afloram nas proximidades da cidade de Imperatriz e extremo oeste do estado do Maranhão. Estes sedimentos são constituídos por matações de arenitos silicificados, silixitos e arenito ferruginoso e formam pacotes inconsolidados de sedimentos angulosos, mal selecionados, que sofreram algum tipo de transporte e se alojaram nas planícies de origem fluvial e lagunar. Consistem em depósitos de sedimentos clásticos inconsolidados modernos, de idade holocênica, relacionados a colúvios.

A Unidade de Terraços Fluviais (Lima e Leite, 1978; Costa Neto et al., 2012) possuem até 12 m de espessura e compreendem depósitos que ocorrem em uma faixa que acompanha o rio Tocantins, no extremo oeste do Maranhão, atualmente distante 5 km a leste de seu leito atual. É representada por cascalhos semiconsolidados, que recobrem discordantemente as formações Corda, Codó e Grajaú.

Klein e Sousa (2012) admitem como Sedimentos Pós-Barreiras os depósitos que recobrem discordantemente o Grupo Barreiras e horizontes de perfis das Coberturas Lateríticas Imaturas e Maturas. Sua área de ocorrência abrange as porções noroeste e centro-leste do estado, englobando parte dos municípios de Maranhãozinho, Centro do Guilherme, Maracaçumé, Turilândia, Santa Helena, São João do Sóter, São Luís, Codó e Caxias. É composta por areias amareladas, marrons e avermelhadas, de espessura média em torno de 2 m a 5 m, bem selecionadas, de granulometria fina a média, principalmente maciças. Lopes e Anjos (2019) identificaram na ilha de São Luís dois episódios de sedimentação dos Sedimentos Pós-Barreiras, ocorridos no Meso/Neo Pleistoceno (Figura 12A) e Holoceno (Figura 12B). Essas idades são compatíveis com as demais encontradas em diversos trabalhos realizados nos litorais do Pará e Noroeste do Maranhão (Tatumi et al., 2008; Oliveira e Silva, 2011 e Rossetti et al., 2013).

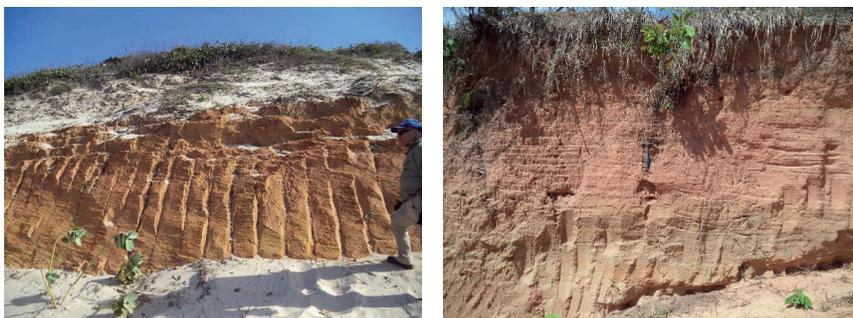


Figura 12: (A) sedimentos arenosos avermelhados (Pós-Barreiras 1) e dunas eólicas da Unidade Depósitos Litorâneos no topo (São Luís, Av. Litorânea); (B) sedimentos arenosos ocre, inconsolidados (Pós-Barreiras 2) (Praia do Panaquatira- São Luís).

Os Depósitos Eólicos Continentais Antigos referem-se aos depósitos de dunas fixas, vegetadas, inativas, caracterizando paleodunas, localizados a sul do campo de dunas livres que constituem os Lençóis Maranhenses. Recobrem uma grande área da região nordeste do estado do Maranhão, chegando a ocorrer, no continente, a cerca de 160 km de distância do litoral, e apresentam o mesmo sentido de migração das dunas móveis (NE-SW) (Santos e Silva, 2009). Segundo Santos e Silva (2009) e Gastão *et al.* (2009), a gênese desta unidade está relacionada a diferentes estágios de deposição de campos de dunas, desde o Pleistoceno Médio (cerca de 123 mil anos, quando ocorre o máximo da última transgressão marinha) até os dias atuais.

Os Depósitos fluviolagunares (Barbosa e Pinto, 1973) estão localizados no extremo norte do estado do Maranhão, na região do Golfão Maranhense, e

compreendem a área rebaixada e alagada dos estuários afogados dos rios Pindaré (Figura 13), Mearim, Itapecuru e Munim. Esta região é caracterizada por apresentar numerosas lagoas fluviais, áreas colmatadas, extensas várzeas inundadas e/ou sujeitas a inundações sazonais. Os depósitos são constituídos por argilas adensadas com areia fina disseminada, maciça, localmente bioturbada, de coloração cinza e plástica (Rodrigues et al., 1994). Estes depósitos estão associados a um evento transgressivo que ocorreu no final do Pleistoceno, que provocou o afogamento dos baixos cursos dos rios da região.



Figura 13: areias inconsolidadas dos Depósitos Fluviolagunares (cidade de Viana-MA).

Os Depósitos de Pântanos e Mangues fazem parte da costa de manguezais de macromarés da Amazônia (Souza Filho, 2005). Estendem-se da Baía de Marajó (PA) até a Baía de São José (MA) e são caracterizados pela presença de inúmeros estuários, com uma série de ilhas, baías e canais controlados pelas macromarés que são semidiurnas e que atingem amplitudes de até 6,54 m na Baía de São Marcos, no Maranhão (DHN, 2025). Constituem extensas planícies lamosas de até 27 km de largura e ficam situados entre os limites de maré alta e baixa. São constituídos predominantemente por sedimentos lamosos (argila e silte) de coloração cinza, plásticos, não adensados, maciços e bioturbados (Rodrigues et al., 1994).

A Unidade Depósitos Litorâneos engloba os depósitos holocênicos de dunas costeiras, praias, planície arenosa e cordões litorâneos antigos, distribuídos por toda a costa do Maranhão, porém apresentando maior expressão em área na porção oeste da Ilha do Maranhão.

Os Depósitos Eólicos Litorâneos correspondem ao campo de dunas livres, ativas, que incluem os Lençóis Maranhenses (Figura 14), localizados no litoral leste do Maranhão, que segundo Gonçalves et al. (2003) representam o maior registro de sedimentação eólica do Quaternário da América do Sul. Apresentam sentido de migração NE-SW e se estendem por até 25 km para o continente, avançando gradativamente sobre os Depósitos Eólicos Continentais Antigos.



Figura 14: Aspecto das dunas eólicas dos Depósitos Eólicos Litorâneos (campo de duas dos Lençóis Maranhenses).

Os Depósitos Aluvionares são constituídos pelos sedimentos clásticos inconsolidados atuais (holocênicos) relacionados às planícies aluvionares atuais dos rios maiores, como Tocantins, Itapecuru e Pindaré, e dos igarapés de pequeno porte, de origem estritamente fluvial, constituídos por sedimentos clásticos arenosos (Figura 15) e argilosos inconsolidados, com raros níveis de cascalho e matéria orgânica.



Figura 15: Areias e argilas dos Depósitos Aluvionares (rio Pindaré-cidade de Viana).

REFERÊNCIAS

ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N.; HASUI, Y. Esboço estratigráfico do Pré-Cambriano da região do Gurupi: estados do Pará e Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camboriú. *Resumos...* Camboriú: SBG, 1980. v. 2, p. 647-658.

AGUIAR, G. A. Revisão geológica da Bacia Paleozóica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1971. v. 3, p. 1.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. The Upper Precambrian of South América. *Boletim Instituto de Geociências USP*, v. 7, p. 45-80, 1976.

ANAISSE JÚNIOR, J. Fácies costeiras dos depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, Bacia do Grajaú. 1999. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1999.

ARAI, M. A Grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Geologia USP: Série Científica*, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.

ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y. A.; LIMA, R. O.; PELOSI, A. P. M.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V. C.; LIMA FILHO, F. P. Fácies e sistema deposicional da Formação Barreiras na região da Barreira do Inferno, litoral oriental do Rio Grande do Norte. *Geologia USP: Série Científica*, v. 6, n. 2, p. 43-49, 2006.

BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. *Folha SA.23 – São Luís e parte da folha SA.24 – Fortaleza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, 1973. p. II/7-II/21. (Levantamentos de Recursos Naturais, 3).

CAMPBELL, D. F. Revised report on the reconnaissance geology of the Maranhão basin. Belém: Petrobrás, 1949. 117 p. (Rept. 7).

CAMPOS, J. E. G.; DARDENE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 3, p. 269-282, set. 1997.

CAROZZI, A. V. Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonífera da Bacia do Maranhão. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1975. (Série Ciência Técnica do Petróleo, 7).

CAPUTO, M. V. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil. 1984. 583 f. Tese (Doutorado em Geologia) – University of California, Santa Barbara, 1984.

CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 2, p. 740-753.

COSTA NETO, M. C.; LOPES, E. C. S.; ANJOS, G. C.; MELO, A. F. F. Geologia e recursos minerais da Folha Imperatriz: SB.23-V-C-V, estado do Maranhão. Escala: 1:100.000. Belém: CPRM, 2012.

COSTA, J. L.; ALMEIDA, H. G. G.; RICCI, P. S. F. Metamorfismo e divisão tectono-estratigráfica do Grupo Gurupi no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., 1996, Belém. *Resumos...* Belém: SGB-Núcleo Norte, 1996. p. 110-112.

COSTA, J. L.; RICCI, P. S. F. Estratigrafia. In: COSTA, J. L. (Org.). *Castanhal: folha SA. 23-V-C: estado do Pará, escala 1:250.000*. Brasília, DF: CPRM, 2000. 1 CD-ROM. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB).

COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 2, p. 146-160, jun. 1991.

COSTA, M. L.; FERNANDEZ, O. J. C.; REQUELME, M. E. R. O depósito de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, geoquímica e evolução geológica. In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (Ed.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, DF: DNPM-CT/Mineral-ADIMB, 2005. p. 227-333.

CUNHA, F. M. B. Fotointerpretação da Bacia de São Luiz, Maranhão. Belém: Petrobrás, 1968. 22 p. (Relatório RENOR, 318/68).

DHN. Tábuas de marés para 2025: Porto de Itaqui (MA). 2025. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/dados_de_mare/14_-_porto_de_itaqui_-_ma_50-52.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation ("Upper Permian") of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, n. 3, p. 24-35, 2002.

DUARTE, A. Fósseis da sondagem de Terezina: estado do Piauí: notas preliminares e estudos. Rio de Janeiro: SGM, 1936.

FRANCISCO, B. H. R.; LOEWENSTEIN, P.; SILVA, O. F. da; SILVA, G. G. Contribuição à geologia da folha de São Luís (SA-23), no estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, n. 17, 45 p., 1971. (Nova Série Geologia).

GASTÃO, F. G. C.; MAIA, L. P.; SIQUEIRA, A. C. A. Estágios da gênese e evolução dos depósitos eólicos e as mudanças climáticas do Quaternário. In: CONGRESSO ARGENTINO DO CUATERNÁRIO Y GEOMORFOLOGIA, 4.; CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 12.; REUNIÓN SOBRE EL CUATERNÁRIO DE AMÉRICA DEL SUR, 2., 2009, La Plata. *Anais... La Plata*, 2009. p. 133-138. 1 CD-ROM.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 57-67, jan./mar. 1994.

GASPAR, M. T. P. *Caracterização climática do Estado do Maranhão*. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 2002. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2002.

GASPAR, M. T. P.; MARTINS, E. S. Zoneamento agroecológico e aptidão agrícola das terras do Maranhão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 594-602, 2011.

GASTAL, C. V. S.; SILVA, E. M. Solos do Nordeste: gênese, classificação e aptidão agrícola. Fortaleza: EMBRAPA Agroindústria Tropical, 1997.

GIAROLLA, A.; LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, L. G. Desertificação no Brasil: conceitos, processos, causas e propostas de mitigação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 2, n. 1, p. 39-51, 2009.

GIULIETTI, A. M.; QUEIROZ, L. P.; WANDERLEY, M. G. L. *Biodiversidade e conservação das plantas no Brasil*. São Paulo: Instituto de Botânica, 2005.

GOMES, M. A. F.; CAVALCANTI, N. B.; SILVA, J. B. Desertificação no Nordeste: uma análise dos núcleos de maior sensibilidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 20, n. 8, p. 695-702, 2016.

GOMES, M. A. F.; OLIVEIRA, R. S. Manejo e conservação dos solos tropicais. Brasília, DF: EMBRAPA Solos, 2010.

GONÇALVES, A. O.; COSTA, L. M.; FERREIRA, M. M. Erosão dos solos e degradação ambiental: uma abordagem geográfica. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 20, n. 2, p. 65-78, 2008.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs.). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2017.

HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do Cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Campinas, v. 13, n. 1, p. 54-64, 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico de pedologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sistema de Contas Nacionais: Brasil 2010-2018*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. *Atlas do Maranhão*. São Luís: IMESC, 2021.

IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. *Zoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão*. São Luís: IMESC, 2018.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Monitoramento da cobertura e uso da terra no Brasil: 2000–2020*. São José dos Campos: INPE, 2021.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JUPIASSÚ, A. M. S. Madeira fóssil – Humiriaceae de Irituia, estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 17, p. 1-12, 1970.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 18, n. 2, p. 247-265, 1956.

KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Geologia e recursos minerais da Folha Santa Luzia do Pará SA.23-V-C-VI, estados do Maranhão e do Pará: escala 1:100.000. Belém: CPRM, 2014. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (Org.). Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão: texto explicativo. Belém: CPRM, 2012. 150 p. Escala 1:750.000. Sistema de Informações Geográficas – SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB.

KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Geologia e recursos minerais da Folha Centro Novo do Maranhão SA.23-Y-B-I, estados do Pará: escala 1:100.000. Belém: CPRM, 2011. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

KLEIN, E. L.; LUZARDO, R.; MOURA, C. A. V.; LOBATO, D. C.; BRITO, R. S. C.; ARMSTRONG, R. Geochronology, Nd isotopes and reconnaissance geochemistry of volcanic and metavolcanic rocks of the São Luís Craton, northern Brazil: implications for tectonic setting and crustal evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 27, p. 129-145, 2009.

KLEIN, E. L.; LARIZZATTI, J. H.; MARINHO, P. A. C.; ROSA-COSTA, L. T.; LUZARDO, R.; FARACO, M. T. L. Geologia e recursos minerais da Folha Cândido Mendes, SA.23-V-D-II: estado do Maranhão: escala 1:100.000. Belém: CPRM, 2008. 146 p. (Programa Geologia do Brasil – PGB; Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB).

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V.; KRYMSKY, R. S.; GRIFFIN, W. L. The Gurupi belt in northern Brazil: lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. *Precambrian Research*, v. 141, p. 83-105, 2005a.

KLEIN, E. L.; PALHETA, E. S.; PINHEIRO, B. L. S.; MOURA, C. A. V.; ABREU, F. A. M. Sistematização da litoestratigrafia do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, p. 415-418, set. 2005b.

KLEIN, E. L. Evolução geológica Pré-Cambriana e aspectos da metalogênese do ouro do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi, NE-Pará/NW-Maranhão, Brasil. 2004. 303 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.

KLEIN, E. L.; KOPPE, J. C.; MOURA, C. A. V. Geology and geochemistry of the Caxias gold deposit, and geochronology of the gold-hosting Caxias Microtonalite, São Luís Craton, northern Brazil. *Journal of South American Earth Science*, v. 14, p. 837-849, 2002.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V. Age constraints on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís Craton and Gurupi Belt, northern Brazil: implications for lithostratigraphy and geological evolution. *International Geology Review*, v. 43, p. 237-253, 2001.

LIMA, M. R.; FULFARO, V. J.; BARTORELLI, A. Análise palinológica de sedimentos cretáceos da região de Marabá, estado do Pará. *Geodiversitas – USP*, São Paulo, n. 11, p. 155-161, 1980.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética: relatório final, etapa III. Belém: DNPM; CPRM, 1978. 190 p. v. 1.

LISBOA, M. A. R. The Permian geology of Northern Brazil. *American Journal of Science*, New Haven, v. 37, n. 221, Série 4, p. 425-443, maio 1914.

LOBATO, G.; BORGHI, L. Análise estratigráfica de alta resolução do limite formacional Longá/Poti, Bacia do Parnaíba: um caso de investigação de possíveis corpos isolados de arenito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas, SP. *Anais...* Campinas, SP: ABPG; PDPETRO, 2007. p. 1-10.

LOBOZIAK, S.; CAPUTO, M. V.; MELO, J. H. G. Middle Devonian-Tournaisian miospore biostratigraphy in the southwestern outcrop belt of the Parnaíba Basin, northcentral Brazil. *Revue de Micropaléontologie*, v. 43, n. 4, p. 303-318, 2000.

LOPES, E. C. S.; ANJOS, G. C. Caracterização geológica. In: ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS, MA: subsídios para o uso sustentável dos recursos hídricos: relatório final, volume I. Brasília: ANA; CPRM, 2019.

LOPES, E. C. S.; KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V.; LUCAS, F. R. A.; PINHEIRO, B. L. S.; RODRIGUES, J. B.; SIMAS, M. W. U-Pb (LA-ICP-MS) of detrital zircon and whole rock Nd and geochemical constraints on the provenance, depositional age and tectonic setting of the metasedimentary Piriá Basin, northern Brazil: implications for the evolution of the Gurupi Belt. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, suppl. 1, p. 123-144, 2016.

MARZOLI, A.; RENNE, P. R.; PICCIRILLO, E. M.; ERNESTO, M.; BELLINI, G.; DE MIN, A. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, v. 284, p. 616-618, 1999.

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S.; STREEL, M. Latest Devonian to early Late Carboniferous biostratigraphy of northern Brazil: an update. *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production*, v. 20, n. 1, p. 13-33, 1998.

MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. P. Estratigrafia das bacias paleozóicas e cretáceas do Maranhão. *Boletim Técnico da Petrobrás*, v. 7, n. 2, p. 137-164, abr./jun. 1964.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. An outline of the geology and petroleum systems of the paleozoic interior basins of South America. *Episodes*, v. 22, n. 3, p. 199-205, 1999.

MULLER, H. Report palynological results of samples examined from wells in Maranhão. Salvador, BA: Petrobrás, 1962. (Relatório, 500).

OLIVEIRA, A. I.; LEONARDOS, O. H. Geologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, 1943. 809 p. il. (Série Didática, 2).

OLIVEIRA, J. G. F.; SILVA, R. C. S. Geologia e recursos minerais da folha Belém, SA.22-X-D-III: estado do Pará. Escala 1:100.000. Belém: CPRM, 2011. 91 p. (Programa Geologia do Brasil – PGB; Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB).

PASTANA, J. M. do N. (Org.). Turiaçu: folha SA.23-V-D, Pinheiro SA.23-Y-B, estados do Pará e Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1995. 205 p., il. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB).

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Coord.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 264. (Coleção Friedrich Katzer).

PEDRÃO, E.; ARAI, M.; CARVALHO, I. S.; FERREIRA, C. S. Palinomorfos de sedimentos Albianos (Formação Itapecuru) da Bacia do Parnaíba. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 66, n. 1, p. 118, mar. 1994. Resumo das comunicações.

PEDRÃO, E.; CARVALHO, I. S.; MARTINS, F. J. C.; SANTOS, M. H. B. Palinoestratigrafia e análise quantitativa de amostras de superfície (Formação Itapecuru, Bacia de São Luís). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 68, n. 2, p. 268, 1996.

PLUMMER, F. B.; PRICE, L. I.; GOMES, F. A. Estados do Maranhão e Piauí. In: BRASIL. Conselho Nacional do Petróleo: *Relatório de 1946*. Rio de Janeiro: [s. n.], 1948. p. 87-134.

PLUMMER, F. D. Geossinclíneo do Parnaíba. Relatório Conselho Nacional do Petróleo. Rio de Janeiro, 1946.

REZENDE, N. A. G. M. A zona zeolítica da Formação Corda, Bacia do Parnaíba. Dissertação (Mestrado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002. 142 p. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, T. L. N.; ARAUJO, C. C.; CAMOZZATO, E.; RAMGRAB, G. E. (Org.). São Luís, Folha SA.23-Z-A, Cururupu Folha SA.23-X-C: estado do Maranhão: escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1994. 185 p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB).

ROSSETTI, D. F. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. *Geologia USP: série científica*, v. 6, n. 2, p. 7-18, 2006.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (coord.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F.; ROCCA, R. R.; TATUMI, S. H. Evolução dos sedimentos pós-Barreiras na zona costeira da Bacia de São Luís, Maranhão, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Naturais*, Belém, v. 8, p. 11-25, jan./abr. 2013.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Geologia. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. (Ed.). *O Neógeno da Amazônia Oriental*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2004. p. 13-52. (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, MA. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Série Ciências da Terra*, v. 9, p. 31-43, 1997.

ROSSETTI, D. F. Facies architecture and sequential evolution of an incised-valley estuarine fill: the Cujupe formation (Upper Cretaceous to? Lower Tertiary), São Luís Basin, northern Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 68, n. 2, p. 299-310, 1998.

ROSSETTI, D. F. Fácies analysis of the lower succession of the Upper Itapecuru Formation, São Luís Basin, northern Brazil. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (Ed.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: Falângola, 1997. p. 241-284.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A. M. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Série Ciências da Terra*, v. 1, p. 25-74, 1989.

SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: reconstituição paleobiológica. Rio de Janeiro: CPRM, 2009. 215 p.

SANTOS, J. H. S.; SILVA, J. X. Datação e evolução dos campos de dunas eólicas inativas dos Lençóis Maranhenses. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa, MG. *Resumos Expandidos...* Viçosa, MG: [s.n.], 2009. v. 1, p. 1-17.

SANTOS JR., A. E. Análise integrada dos depósitos de caulim na região do Rio Capim: fácies, estratigrafia, petrografia e isótopos estáveis. 2006. 107 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

SANTOS JR., A. E. Reconstrução paleoambiental e estratigráfica de depósitos cretáceos e terciários expostos na borda sudeste da Sub-bacia de Cametá, Norte do Brasil. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

SANTOS JR., A. E.; ROSSETTI, D. F. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, leste da Sub-bacia de Cametá. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 3, p. 313-324, set. 2003.

SGARBI, G. N. C. Geologia da Formação Areado, Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, oeste do estado de Minas Gerais. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. 324 p. (Dissertação de Mestrado).

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação do maior cinturão contínuo de manguezais do mundo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

TATUMI, S. H.; SILVA, L. P.; PIRES, E. L.; ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; MUNITA, C. S. Datação de sedimentos pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 3, p. 514-524, 2008.

TEIXEIRA, K. S.; MOURA, C. A. V.; TRUCKENBRODT, W.; KLEIN, E. L. K.; CHEMALE JÚNIOR, F. Petrografia, geoquímica e geocronologia da Formação Igarapé de Areia, NE-Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 11., 2007, Atibaia, SP. *Anais...* Atibaia, SP: SBG, 2007. 1 CD-ROM.

TRUCKENBRODT, W.; NASCIMENTO, M. S.; GÓES, A. M. Distribuição de minerais pesados em arenitos de formações fanerozóicas no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. In: GOES, A. M.; NASCIMENTO, M. S.; TRUCKENBRODT, W. (Org.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: SBG, 2005. v. 4, p. 180-189.

VAZ, P. T.; REZENDE, V. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n. 2, p. 253-264, 2007.



CAPÍTULO 2

RELEVO, ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS NA FORMAÇÃO DOS SOLOS DO MARANHÃO

Glécio Machado Siqueira

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Leonardo Gonçalves de Lima

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Guilherme Domingues Ferreira

Mestrando – Universidade Federal do Maranhão

Eduardo Carvalho da Silva Neto

Professor - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Marcos Gervasio Pereira

Professor - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

O estado do Maranhão apresenta uma configuração geomorfológica diversa, resultante de processos geológicos e climáticos. Neste capítulo, são apresentadas as principais formas e compartimentos do relevo maranhense, aspectos geomorfológicos e hidrográficos e sua influência sobre os processos pedogenéticos e a distribuição das classes de solos no estado. A diversidade de formas do relevo resulta de processos geológicos e climáticos de longa duração, como soerguimentos tectônicos, sedimentação e erosão, que, aliados à influência das formações sedimentares da Bacia do Parnaíba e do Grupo Barreiras, condicionam a formação e a distribuição dos solos no estado. A compartimentação em domínios geomorfológicos, como o Golfão Maranhense, as Chapadas das Mangabeiras e os Tabuleiros Costeiros, define zonas com dinâmicas hidrológicas e pedogenéticas distintas. As principais classes de solos estão associadas aos diferentes compartimentos morfoestruturais: Latossolos, Argissolos, Gleissolos, Plintossolos, entre outros. As bacias hidrográficas, por sua vez, desempenham papel central na dinâmica dos solos ao modular o transporte e a deposição de sedimentos, além de influenciarem diretamente a fertilidade e o uso agrícola. Compreender a relação entre relevo, geomorfologia e hidrografia é essencial para o planejamento territorial e para o manejo sustentável dos recursos naturais do Maranhão.

1. INTRODUÇÃO

O relevo, entendido como a configuração da superfície terrestre, exerce papel fundamental nos processos de formação e evolução dos solos. Sua forma influencia diretamente o escoamento da água sobre e dentro do solo, afetando processos de formação do solo, erosão, lixiviação e concentração de nutrientes, além da oxidação e redução de elementos. Dessa forma, os processos geomorfológicos na superfície terrestre e as formas de relevo resultantes contribuem para a formação e distribuição do solo, enquanto, em contrapartida, o desenvolvimento e as propriedades do solo influenciam a evolução da paisagem geomórfica (Oliveira et al., 2021). Assim, o relevo é um dos principais fatores que modulam a pedogênese em escalas local e regional.

A geomorfologia do Estado do Maranhão caracteriza-se por um relevo dominado por extensas planícies fluviomarinhas e superfícies tabulares, intercaladas por chapadas, baixos platôs e vales aluviais (Dantas et al., 2020). Essa diversidade morfológica resulta de uma longa história geológica e geomorfológica marcada por episódios de soerguimento tectônico diferencial, especialmente após o Cretáceo, e por sucessivos ciclos de aplainamento e dissecação regional ao longo do Cenozoico (Barbosa et al., 1973a, 1973b; Ross, 1985). O embasamento geológico do estado é composto majoritariamente por rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, com destaque para as formações Itapecuru, Codó, Pastos Bons e Grajaú, além de contribuições do Grupo Barreiras e de depósitos cenozoicos mais recentes. Rochedos ígneos e metamórficos afloram apenas em pequenas áreas associadas ao Cráton São Luís e ao Cinturão Gurupi.

As formas do relevo no Maranhão refletem essa base geológica heterogênea e os distintos ambientes deposicionais que originaram sedimentos marinhos, litorâneos, fluviais e eólicos. O soerguimento da Bacia do Parnaíba, associado à estabilidade morfodinâmica do Paleógeno, favoreceu a formação de chapadas amplas, como as das Mangabeiras, Alpercatas e Tiracambu, muitas das quais podem ser associadas à antiga Superfície Sul-Americana (King, 1956). Sobre esses topos tabulares, desenvolveram-se espessos mantos de intemperismo e perfis lateríticos bauxítico-ferruginosos, com elevados teores de óxidos de ferro e alumínio, registrados em contextos paleoambientais do Eoceno e Oligoceno (Costa, 1991; Kotschoubey et al., 2005).

Em áreas planas ou suavemente onduladas, como nas planícies litorâneas e nos tabuleiros costeiros, a infiltração da água no solo é favorecida, e o escoamento superficial é reduzido, levando a formação de perfis mais espessos. Em contrapartida, encostas inclinadas e formas convexas promovem maior mobilidade hídrica e remoção de material por erosão. Vertentes côncavas, como fundos de vale e depressões, concentram o fluxo de água, favorecendo a saturação periódica e a formação de solos hidromórficos, como os Gleissolos (Dantas et al., 2021).

A geodiversidade do Maranhão, somada ao fato de o estado integrar uma das principais zonas de transição fitoclimática do Brasil - entre os domínios morfoclimáticos da Amazônia, do Cerrado e da Caatinga (Ab'Saber, 2003) - reforça o papel do relevo como componente estruturante da paisagem e modulador dos processos de formação dos solos. Neste capítulo, são apresentadas as principais formas e compartimentos do relevo maranhense, aspectos geomorfológicos e hidrográficos e sua influência sobre os processos pedogenéticos e a distribuição das classes de solos no estado.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROGRÁFICA DO MARANHÃO: CONTRIBUIÇÕES PARA A FORMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS SOLOS

- Relevo do Estado do Maranhão

O relevo do estado do Maranhão é predominantemente plano, com cerca de 90% de sua superfície situada abaixo de 300 metros de altitude. Esse território pode ser compartimentado em três grandes unidades morfoestruturais: a Planície Litorânea, os Planaltos e as Chapadas (Figura 1). A Planície Litorânea estende-se ao longo de todo o litoral maranhense, avançando até aproximadamente 300 km em direção ao interior. Nessa faixa, destaca-se a Baixada Maranhense, composta por áreas com baixas altitudes, entre 0 e 3 metros, que favorecem a formação de amplas planícies alagadas durante o período chuvoso, de janeiro a junho. A planície integra o chamado Golfão Maranhense (Ab'Sáber, 1960), uma unidade geomorfológica singular que se estende da Baixada Maranhense até a Baía de São Marcos, englobando a Ilha do Caranguejo e abrigando ambientes diversos como pântanos salinos e de água doce, lagos intermitentes e canais estuarinos (Teixeira & Sousa Filho, 2009).

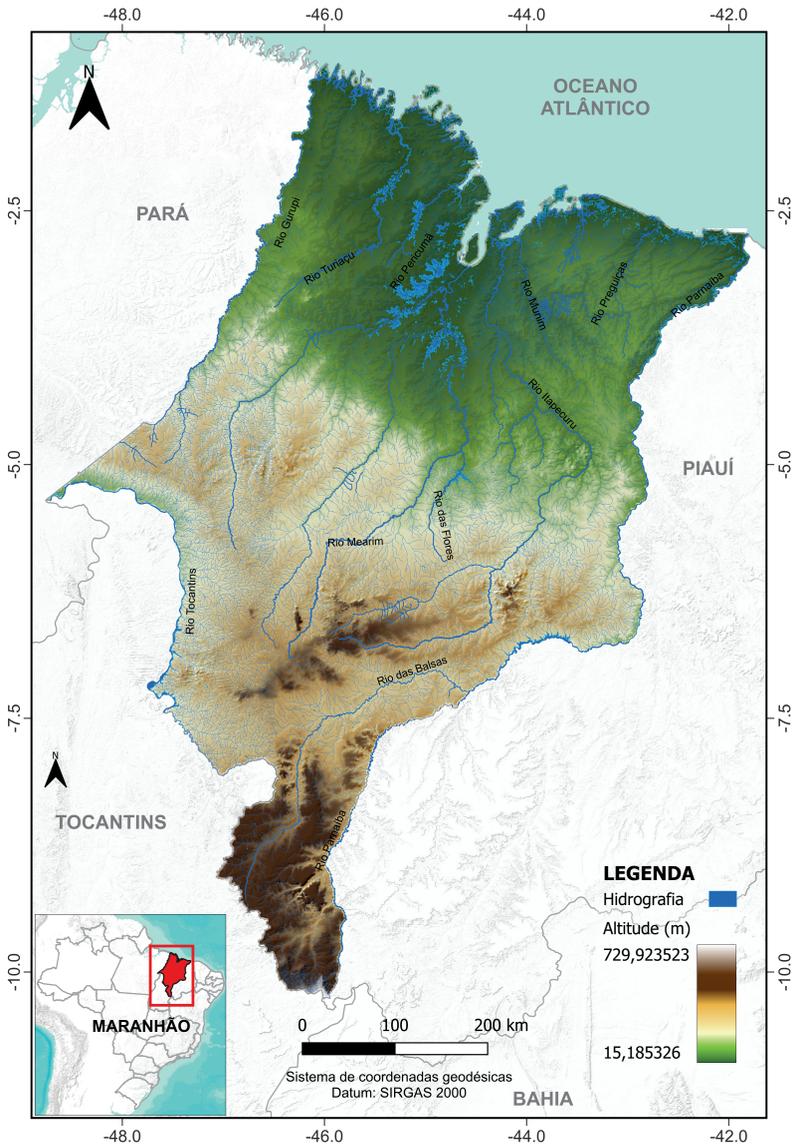


Figura 1. Mapa do relevo do Maranhão.

O Golfão Maranhense compreende uma faixa de terras emersas entre as baías de São Marcos e São José, separadas pela Ilha de Upaon-Açu (ou Ilha de São Luís). Essa região é caracterizada por sistemas de manguezais complexamente estruturados e influenciada por macromaré semidiurna, com variações médias de 4 metros e máximas de até 7 metros. As baías mencionadas se destacam por receberem os principais rios do estado — como o Itapecuru, Mearim, Pindaré, Munim e Aurá — e por concentrarem significativa atividade econômica e circulação de bens.

No mesmo contexto litorâneo, destaca-se o Campo de Perizes, uma extensa planície flúvio-marinha com campos halófilos de várzea, situada entre os municípios de São Luís, Bacabeira e Rosário. Essa região é marcada pela presença de solos hidromórficos, altamente influenciados pelo regime hídrico e pelas condições topográficas que favorecem o acúmulo de matéria orgânica em função da drenagem impedida.

Durante o período chuvoso, os rios da Planície Litorânea transbordam, promovendo o transporte de grandes volumes de sedimentos. Esse aporte sedimentar favorece a formação de solos férteis, amplamente utilizados por comunidades ribeirinhas, sobretudo na produção de arroz e mandioca. A diversidade ambiental da planície inclui praias, falésias, campos inundáveis, lagunas e áreas pantanosas, onde ocorrem diferentes classes de solos, como Gleissolos, Vertissolos, Espodossolos, Neossolos Quartzarênicos, Argissolos e Neossolos Litólicos, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2025).

Na porção interior do estado, encontram-se os Planaltos e Chapadas, que atuam como zonas de transição entre a planície litorânea e as regiões mais elevadas. Essas unidades são formadas predominantemente por arenitos com diferentes graus de resistência à erosão, dando origem a serras, chapadas e escarpas. O ponto culminante do relevo maranhense é a Chapada das Mangabeiras, com 804 metros de altitude. Essa região, localizada ao sul do estado, constitui um importante centro de produção agropecuária, com destaque para as lavouras de soja e milho.

Os Planaltos do Sul do Maranhão são subdivididos em três compartimentos principais: o Planalto Meridional, que abriga a Serra da Mangabeira; o Planalto Central, situado no centro-sul do estado e abrangendo o Parque Nacional da Chapada das Mesas; e o Planalto Ocidental, com morfoesculturas alinhadas no sentido nordeste-sudoeste, destacando-se serras como Gurupi, Tiracambu e Desordem. Essas unidades apresentam altitudes variáveis entre 200 e 800 metros e possuem solos predominantemente classificados como Latossolos, Argissolos, Neossolos Quartzarênicos, Cambissolos e Plintossolos.

Segundo Dantas et al. (2024), em áreas sob influência amazônica, são observados solos com caráter coeso, uma propriedade diagnóstica relevante na diferenciação de algumas classes do SiBCS, como Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Argissolos Acinzentados. Esses solos se desenvolvem a partir de sedimentos da Formação Barreiras e depósitos associados, comuns nos Tabuleiros Costeiros e na faixa de transição entre o Maranhão e a Amazônia Legal.

- Domínios Geomorfológicos

O estado do Maranhão apresenta 18 domínios geomorfológicos (Figura 2), definidos a partir de características litológicas, estruturais e morfoesculturais, os quais condicionam não apenas a morfologia do relevo, mas também a dinâmica hídrica, o uso da terra e o desenvolvimento dos solos.

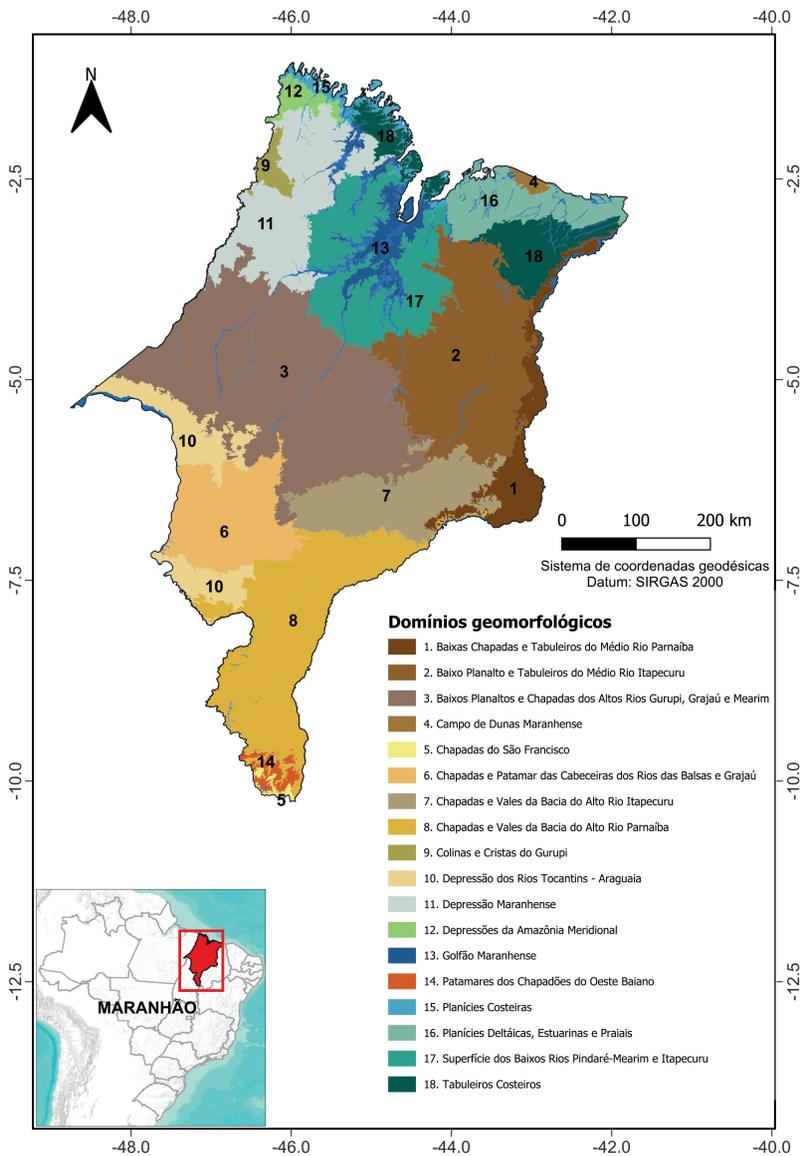


Figura 2. Mapa dos domínios geomorfológicos do Maranhão.

A diversidade paisagística está diretamente relacionada à sua compartimentação geomorfológica. Os domínios são os seguintes: 1) Baixas Chapadas e Tabuleiros do Médio Rio Parnaíba, 2) Baixo Planalto e Tabuleiros do Médio Rio Itapecuru, 3) Baixos Planaltos e Chapadas dos Altos Rios Gurupi, Grajaú e Mearim, 4) Campo de Dunas Maranhense, 5) Chapadas do São Francisco, 6) Chapadas e Patamar das Cabeceiras dos Rios das Balsas e Grajaú, 7) Chapadas e Vales da Bacia do Alto Rio Itapecuru, 8) Chapadas e Vales da Bacia do Alto Rio Parnaíba, 9) Colinas e Cristais do Gurupi, 10) Depressão dos rios Tocantins-Araguaia, 11) Depressão Maranhense, 12) Depressões da Amazônia Meridional, 13) Golfão Maranhense, 14) Patamares dos Chapadões do Oeste Baiano, 15) Planícies costeiras, 16) Planícies Deltáicas, Estuarinas e Praias, 17) Superfície dos Baixos Rios Pindaré-Mearim e Itapecuru e 18) Tabuleiros Costeiros.

A geomorfologia do Maranhão é caracterizada, em sua maior parte, por relevos planos a suave ondulados, dominados por planícies sedimentares recentes, tabuleiros costeiros, chapadas e depressões. Estima-se que aproximadamente 90% do território estadual esteja abaixo de 300 metros de altitude, o que evidencia a importância dos processos de aplainamento e sedimentação na conformação da paisagem.

Destacam-se dois grandes conjuntos morfoestruturais: a Planície Litorânea, com suas feições flúvio-marinhas e ambientes alagáveis — como o Golfão Maranhense e a Baixada Maranhense —, e as unidades planálticas e tabulares do interior, como as Chapadas do Sul do Maranhão (Chapada das Mangabeiras e Chapada das Mesas), que representam os setores de maior altitude e maior potencial erosivo. Nesses compartimentos mais elevados predominam arenitos silicificados e coberturas lateríticas, responsáveis por relevo dissecado, escarpas e vales encaixados (Dantas et al., 2021).

Além das feições litorâneas e das grandes chapadas, os Tabuleiros Costeiros se destacam como formas amplas, suave onduladas, compostas por sedimentos da Formação Barreiras. Essas unidades são recorrentes ao longo da costa Atlântica e influenciam fortemente a gênese de solos que podem apresentar horizontes coesos como os Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos e solos hidromórficos como os Gleissolos, especialmente nas transições com áreas de influência amazônica.

Outro destaque geomorfológico é o Campo de Dunas Maranhense, que compreende formações eólicas modernas, como nos Lençóis Maranhenses, formadas por ação do vento sobre sedimentos arenosos quaternários. Essas feições dinâmicas, de importância ecológica e turística, abrigam solos com pequeno grau de desenvolvimento pedogenético, como os Neossolos Quartzarênicos, e exercem influência significativa sobre os regimes hídricos subterrâneos.

O mosaico geomorfológico do Maranhão condiciona diretamente a estrutura das bacias hidrográficas, o padrão de drenagem e a distribuição dos recursos naturais. As interfaces entre domínios, como as zonas de contato entre planícies inundáveis e vertentes tabulares, constituem áreas de elevada sensibilidade ambiental e grande diversidade pedológica. Assim, a compartimentação em domínios geomorfológicos não apenas expressa a variedade de formas do relevo maranhense, como também serve de base para a interpretação da distribuição das classes de solos, do uso da terra e das potencialidades agrícolas e ecológicas de cada região.

- Bacias Hidrográficas

Conforme destacado, a geomorfologia do Maranhão é caracterizada por um relevo predominantemente plano, dominado por planícies sedimentares e extensos planaltos dissecados, com destaque para a planície litorânea e os Tabuleiros Costeiros. A maior parte do território maranhense encontra-se abaixo de 300 metros de altitude, conformando uma paisagem marcada por formas suaves, modeladas por agentes externos ao longo de extensos períodos geológicos. Esses compartimentos geomorfológicos estão diretamente associados à organização das bacias hidrográficas, que desempenham papel fundamental na dinâmica ambiental e no uso dos solos.

O estado do Maranhão abriga 15 bacias hidrográficas principais: 1) Acará/Guamá, 2) Alto Parnaíba, 3) Baixo Parnaíba, 4) Baixo Tocantins, 5) Balsas, 6) Boa Esperança, 7) Guirupi, 8) Itapecuru. 9) Mearim, 10) Médio Parnaíba, 11) Médio Tocantins, 12) Munim, 13) Peria/Preguiças, 14) São Luís e 15) Turiaçu/Pericumã. A distribuição dessas bacias reflete a compartimentação morfoestrutural do estado (Figura 3). As bacias do Alto, Médio e Baixo Parnaíba, por exemplo, estão associadas às Baixas Chapadas e Tabuleiros do Médio Rio Parnaíba, e às Chapadas e Vales das bacias do Itapecuru e Parnaíba, onde predominam relevos tabulares formados a partir de arenitos. Essas formações favorecem a dissecação da paisagem e o transporte de sedimentos ao longo dos vales, especialmente no caso do Rio Parnaíba, cuja carga sedimentar contribui para a formação do Delta das Américas, um dos maiores deltas em mar aberto do continente.

Nas planícies aluviais associadas ao Rio Parnaíba, é comum a ocorrência de Gleissolos, Latossolos e Argissolos, além de Vertissolos em menor expressão. A composição litológica das regiões de cabeceira influencia a fertilidade dos solos e a aptidão agrícola dessas áreas. No litoral maranhense, particularmente a oeste da Baía de Turiaçu, são observadas características geológicas distintas. A leste predominam rochas cretáceas da Formação Itapecuru, que originam formas tabulares pela dissecação de antigas superfícies de aplainamento. A oeste, o embasamento cristalino do núcleo Gurupi, de origem pré-cambriana, dá origem a relevos colinosos, fragmentados e mais antigos, onde predominam Latossolos, Argissolos, Nitossolos e Plintossolos.

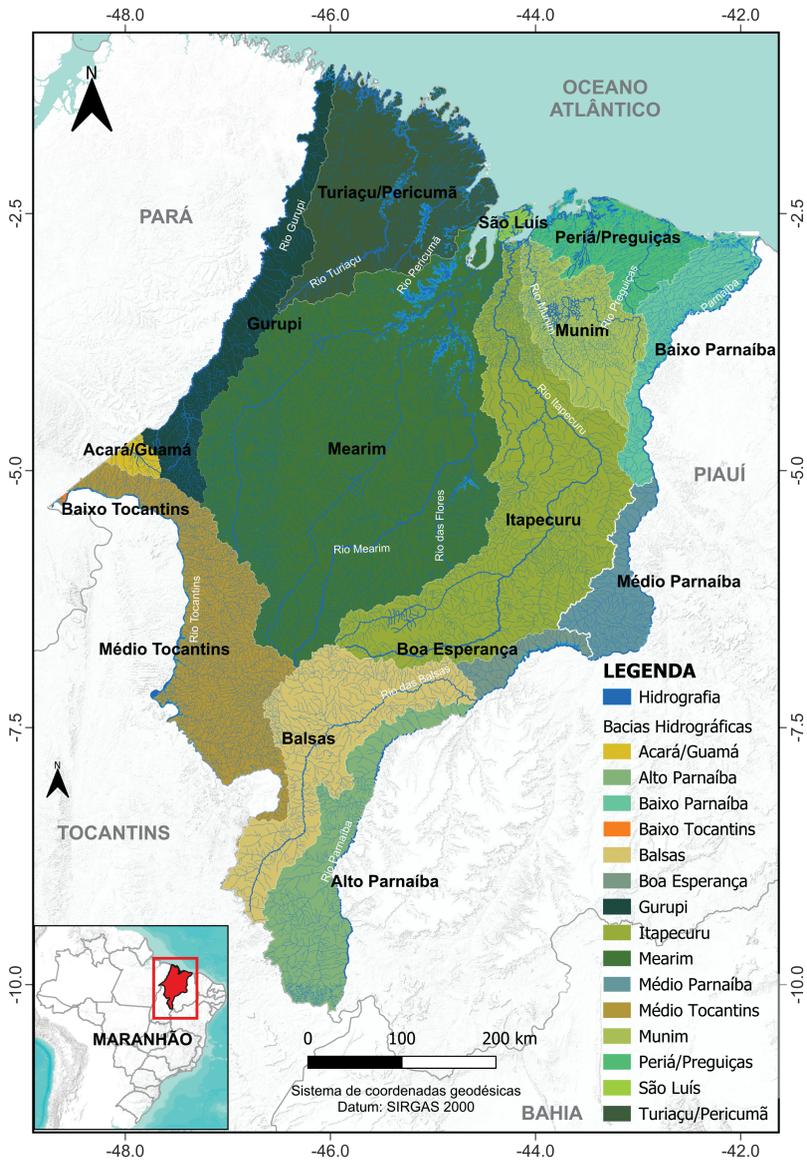


Figura 3. Mapa das Bacias hidrográficas do Maranhão.

As Reentrâncias Maranhenses, situadas no litoral ocidental, correspondem a um complexo sistema de manguezais, áreas estuarinas e planícies costeiras. Trata-se de uma das maiores áreas contínuas de manguezal do mundo, com cerca de 12.000 km², em associação com o estado do Pará. Essas formações são fundamentais para a biodiversidade costeira e para o equilíbrio climático global, funcionando como berçários naturais de espécies pesqueiras e áreas de elevado potencial de armazenamento de carbono no solo. Os Gleissolos são predominantes nessas áreas, devido à forte influência hidrológica e marinha.

A Bacia do Rio Gurupi, por sua vez, destaca-se por seu papel social e ecológico. Sua calha fluvial é intensamente utilizada por comunidades tradicionais, especialmente em períodos de cheia, quando os sedimentos depositados permitem o cultivo de arroz, mandioca, feijão e, eventualmente, milho. Os solos mais frequentes ao longo dessa bacia são os Gleissolos e os Argissolos, cuja fertilidade relativamente alta (?) favorece práticas agrícolas tradicionais.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos aspectos geomorfológicos e hidrológicos do Maranhão evidencia a relação entre os componentes físicos da paisagem e os processos de formação, evolução e distribuição dos solos. O predomínio de formas planas e suavemente onduladas, associado à diversidade de unidades geomorfológicas, como planícies costeiras, tabuleiros, chapadas e vales, resulta em uma configuração ambiental heterogênea, com marcadas variações nos regimes hidrológicos e nos processos pedogenéticos.

As grandes planícies fluviomarinhas e áreas inundáveis da Planície Litorânea, como o Golfão Maranhense e a Baixada Maranhense, favorecem a formação de solos hidromórficos e de alta fertilidade relativa, fundamentais para os modos de vida tradicionais e a agricultura de subsistência. Já as áreas de chapadas e planaltos, especialmente no sul do estado, estão associadas à ocorrência de solos mais intemperizados e profundos, como os Latossolos e Argissolos, nos quais se observa a expansão do agronegócio, notadamente nas culturas de grãos.

A compartimentação em domínios geomorfológicos e a estrutura das bacias hidrográficas refletem o controle geológico e tectônico exercido sobre a paisagem maranhense. Além disso, contribuem para a compreensão da distribuição espacial das classes de solos, da dinâmica hídrica e das potencialidades agrícolas e ambientais. Áreas de transição entre domínios geomorfológicos, como interfaces entre chapadas e vales, ou entre tabuleiros e planícies alagáveis, configuram zonas de elevada complexidade ambiental e pedológica, demandando atenção especial no planejamento territorial e na conservação dos recursos naturais.

Assim, compreender a influência dos aspectos geomorfológicos e hidrológicos na formação dos solos do Maranhão é fundamental não apenas para fins acadêmicos e de levantamento pedológico, mas também para subsidiar estratégias sustentáveis de uso da terra, manejo dos recursos hídricos e valorização da sociobiodiversidade maranhense.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Contribuição à geomorfologia do estado do Maranhão. *Notícia Geomorfológica*, v. 3, n. 5, p. 35–45, abr. 1960.

AB'SABER, A. N. *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 160 p.

BARBOSA, G. V.; BOAVENTURA, R. S.; NOVAES PINTO, M. Geomorfologia da Folha SB.23 Teresina e parte da Folha SB.24 Jaguaribe. In: PROJETO RADAM. Folha SB.23 Teresina e parte da folha SB.24 Jaguaribe: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1973. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 2).

BARBOSA, G. V.; NOVAES PINTO, M. Geomorfologia da Folha SA.23 São Luís e parte da Folha SA.24 Fortaleza. In: PROJETO RADAM. Folha SA.23 São Luís e parte da folha SA.24 Fortaleza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1973. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 3).

COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 2, p. 146–160, 1991.

DANTAS, J. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1039–1050, 2014.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I. C. N.; LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; TEIXEIRA, W. G. Análise integrada das paisagens do estado do Maranhão. In: SILVA, M. B. et al. (org.). *Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão*. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2020. p. 92–147.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 18, n. 2, p. 147–265, 1956.

KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W.; CALAF, J. M. C. Evolução geológica da porção meridional da Província Bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará e Oeste do Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 2, p. 263–272, 2005.

OLIVEIRA, F. S.; FURQUIM, S. A. C.; PEREIRA, M. G.; SOUZA, C. D.; NETO, E. C. S.; CALEGARI, M. R.; COSTA, A. M. A pedologia e seus diálogos científicos: abordagens analíticas transversais para o estudo dos solos. In: *SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG: SBCS, 2021. v. 11, p. 1–54.

ROSS, J. L. S. Relevô brasileiro: uma nova proposta de classificação. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 4, p. 25–39, 1985.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

TEIXEIRA, S. G.; SOUZA FILHO, P. W. M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, supl. 1, p. 69–82, 2009.



CAPÍTULO 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 & DanniOliveira (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 eluviação 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 intrasazonal, 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 eluviação, 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 Luvisolos, 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 Sálícos, 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	Ferralitização (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.

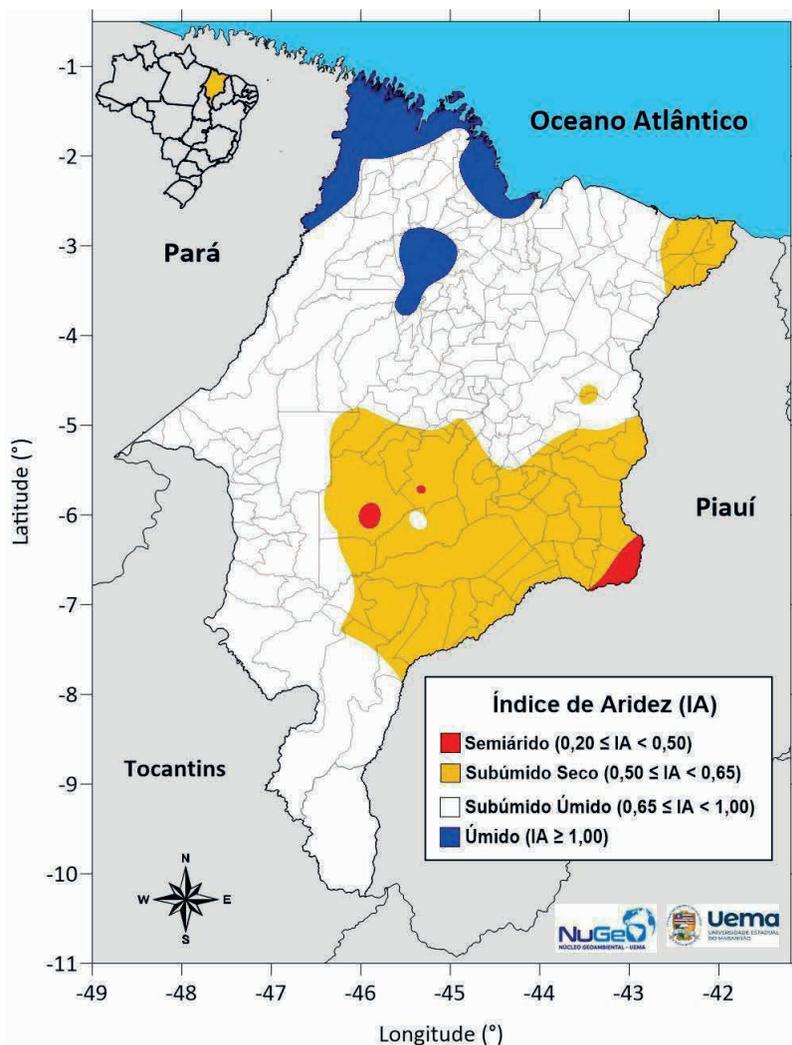


Figura 1. Espacialização do Índice de Aridez (IA) no estado do Maranhão.

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.

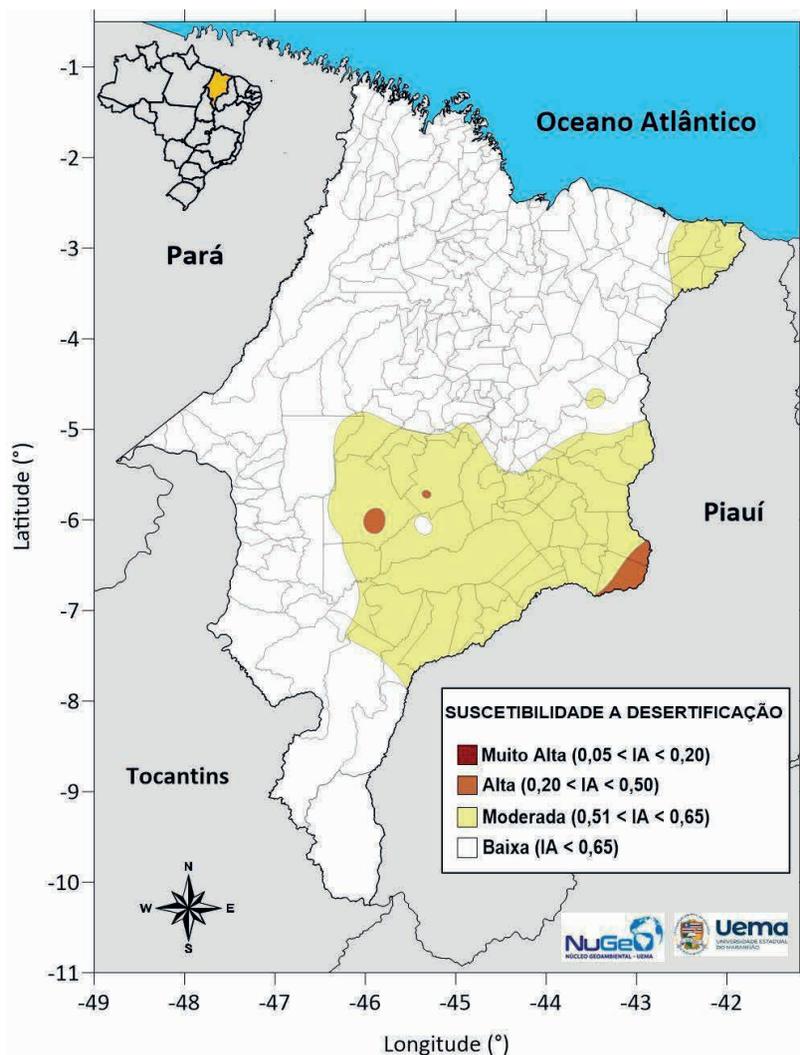


Figura 2. Espacialização da susceptibilidade à desertificação no Maranhão.

[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 $4,5 W/m^2$ até 2100; e o RCP 8.5, um cenário pessimista que assume altas emissões contínuas de GEE, resultando em um forçamento radiativo de $8,5 W/m^2$ 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).

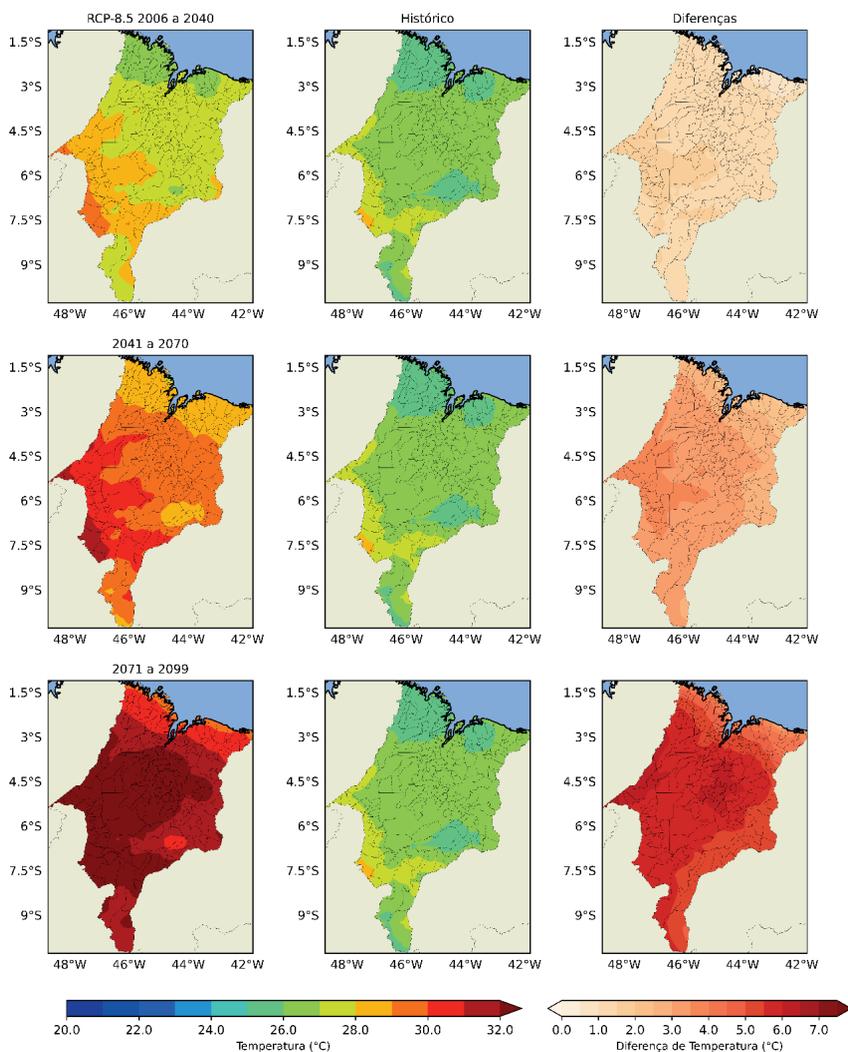


Figura 3. Regionalização de cenários climáticos de temperatura do ar (°C) no estado do Maranhão com o modelo regional Eta-CPTEC/INPE analisados para os diferentes períodos do século XXI (2006-2040; 2041-2070 e 2071-2099): Cenário RCP8.5 (primeira coluna); Cenário do clima presente (segunda coluna); e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

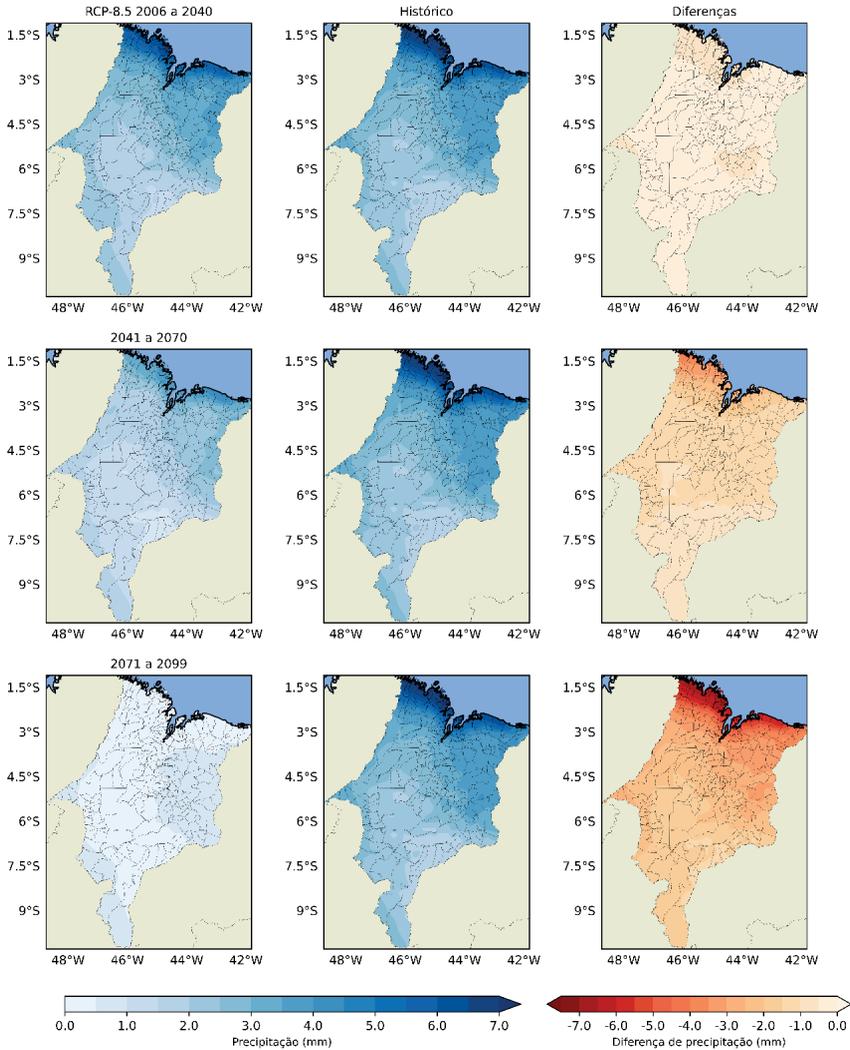


Figura 4. Regionalização de cenários climáticos de precipitação (mm) no estado do Maranhão com o modelo regional Eta-CPTEC/INPE analisados para os diferentes períodos do século XXI (2006-2040; 2041-2070 e 2071-2099): Cenário RCP8.5 (primeira coluna); Cenário do clima presente (segunda coluna); e diferenças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

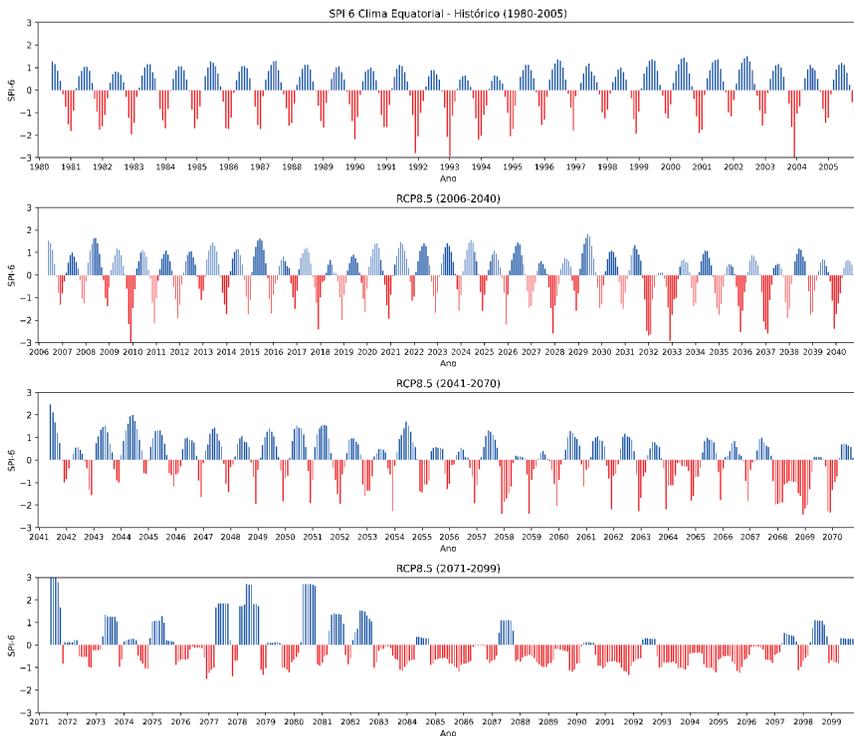


Figura 5. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Cândia Mendes (clima equatorial).

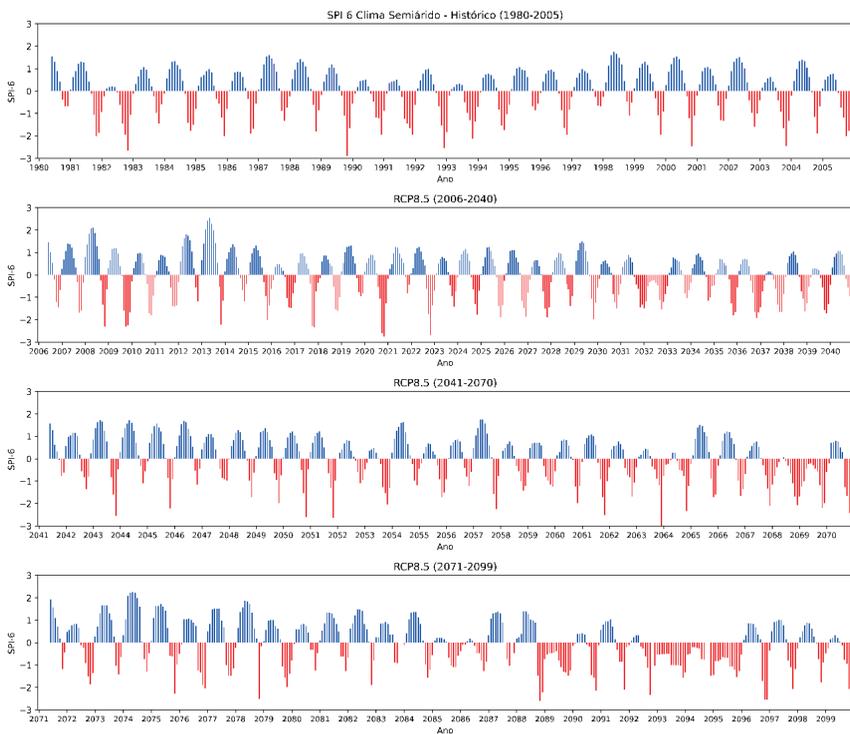


Figura 6. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Grajaú (clima semiárido).

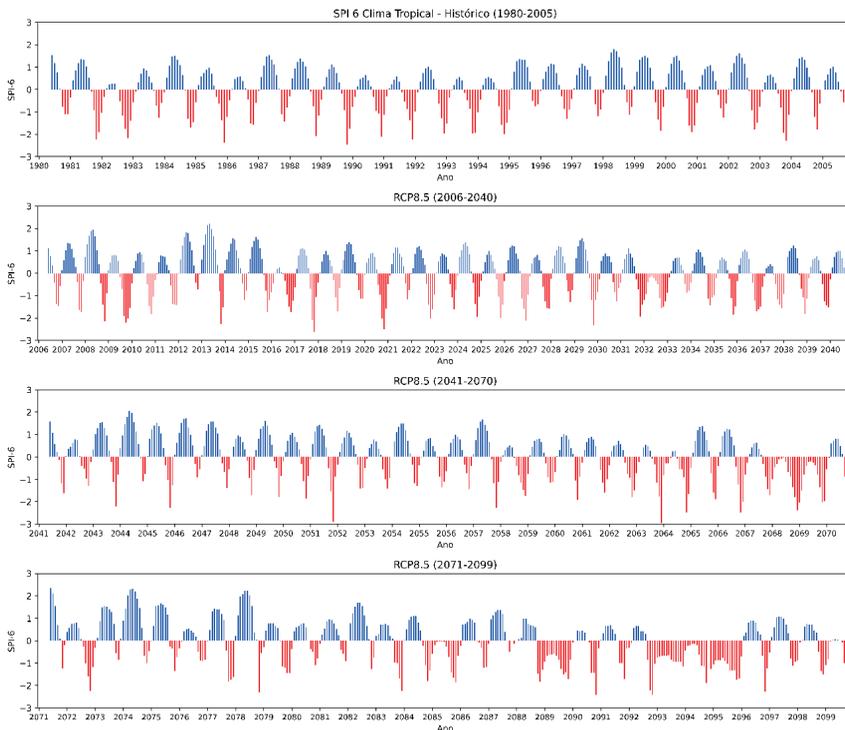


Figura 7. Índice de Precipitação Padronizado para a janela de 6 meses (SPI_6) na localidade de Imperatriz (clima tropical).

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.

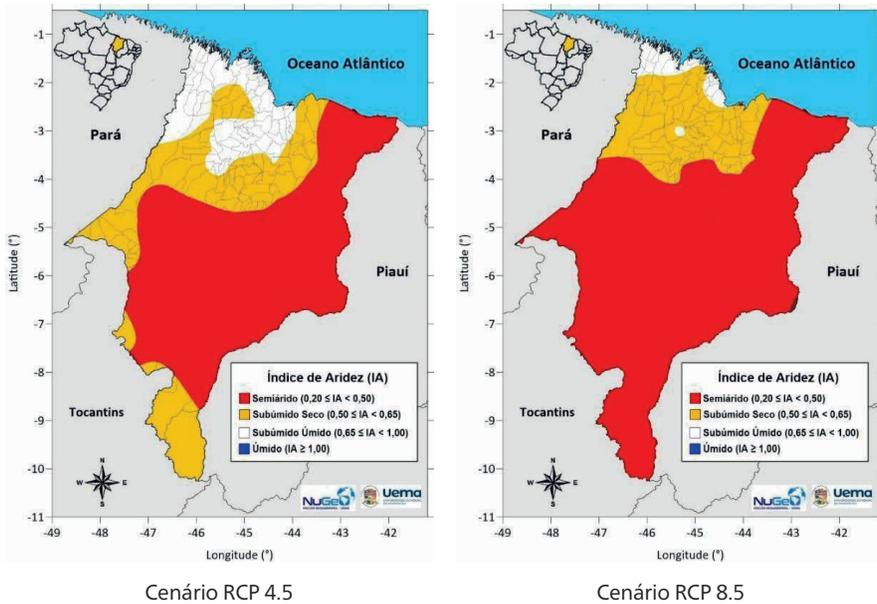


Figura 8. Projeção do Índice de Aridez (IA) no Maranhão até 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.

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 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

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.

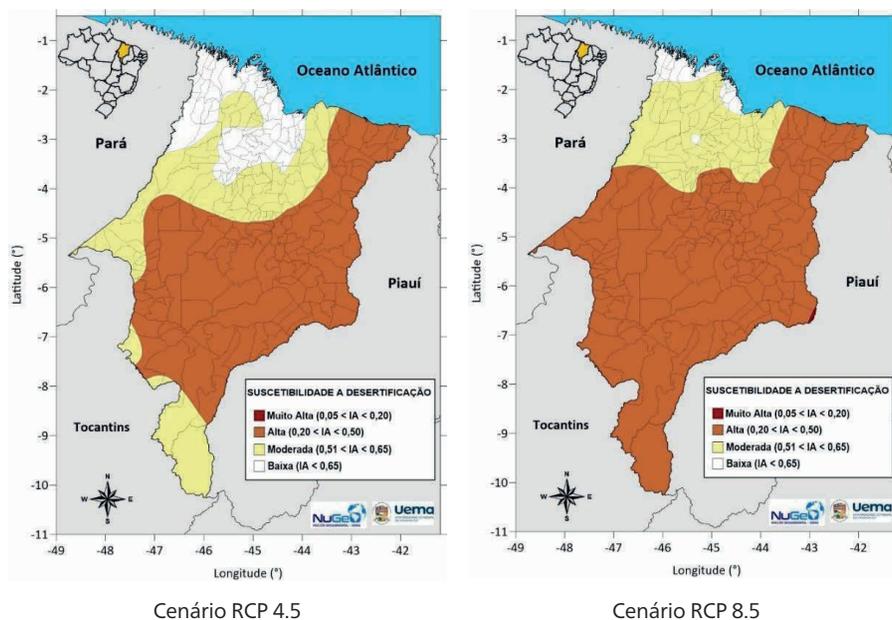


Figura 9. Projeção da suscetibilidade à desertificação no Maranhão em 2059 sob os cenários RCP 4.5 e 8.5.

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/doc_num.php?explnum_id=7768. Acesso em: 12 jun. 2025.



CAPÍTULO 4

ORGANISMOS: ECOSISTEMAS DO MARANHÃO E COMPOSIÇÃO DA PAISAGEM

Glécio Machado Siqueira

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Aldair de Souza Medeiros

Professor – Universidade Federal do Piauí

Guilherme Domingues Ferreira

Mestrando – Universidade Federal do Maranhão

Lucas Cardoso Marinho

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Lailda Brito Soares

Mestranda - Universidade Federal do Maranhão

Mizalene Silva da Silva

Mestra - Universidade Federal Rural da Amazônia

Raysa Valéria Carvalho Saraiva

Professora - Universidade Federal do Maranhão

Camila Pinheiro Nobre

Professora – Universidade Estadual do Maranhão

1. ORGANISMOS E O INTEMPERISMO

A origem do solo está diretamente relacionada à ação do intemperismo de rochas, mas os organismos vivos (fauna e flora) desempenham um papel essencial nesse processo.

A seguir serão apresentados os principais grupos de organismos envolvidos na origem e na formação do solo:

a. Microrganismos

- Bactérias: decompõem a matéria orgânica, participam do ciclo do nitrogênio e ajudam na mineralização.

- Fungos: decompõem resíduos orgânicos complexos e formam micorrizas (associações simbióticas com raízes).

- Actinobactérias: intermediárias entre bactérias e fungos, importantes na decomposição de material orgânico resistente.

b. Organismos vegetais

- Algas e líquens: líquens (associação entre fungo e alga ou cianobactéria); colonizam superfícies rochosas e contribuem para o processo de intemperismo químico, liberando ácidos que desgastam as rochas.

- Plantas: Após os líquens, pequenas plantas colonizam o local, aumentando a formação de matéria orgânica, e suas raízes penetram nas fissuras das rochas e exercem pressão física, permitindo a fragmentação do material de origem; suas raízes exsudam ácidos orgânicos que contribuem para o intemperismo químico.

c. Fauna do solo (macro, meso e microfauna)

- Minhocas: Misturam camadas de solo, aumentam a porosidade e aceleram a decomposição.

- Cupins e formigas: Constroem túneis, promovem aeração e redistribuição de nutrientes.

- Outros invertebrados: Besouros, ácaros, colêmbolos — ajudam na fragmentação da matéria orgânica.

d. Homem

- Que pode contribuir ou retardar a formação do solo

2. ECOSSISTEMAS DO MARANHÃO

O estado do Maranhão encontra-se na zona limítrofe entre o Cerrado, o qual faz parte da Diagonal Seca que corta o território brasileiro, e o domínio Amazônico, caracterizado pelas florestas úmidas sob forte influência hidrográfica. Essa zona de transição favorece o estabelecimento de diversas fitofisionomias resultantes das áreas de tensão entre estes diferentes domínios. Ao se afastar da Floresta Amazônica (Fig. 1A) em direção à região central do Brasil, a vegetação gradativamente torna-se com menor porte e com características xeromórficas.

É equivocado pensar que o Cerrado e a Floresta Amazônica possuem uma uniformidade de fitofisionomias. Distribuídos dentro destes grandes domínios, existem intensas variações florestais resultantes da distância de cursos d'água, tipos de solos e precipitação. O Cerrado, por exemplo, inclui: formações florestais, tais como as matas ciliares (Fig. 1C), mata de galeria e cerradão; há formações savânicas, tais como o Cerrado stricto sensu e veredas e formações campestre, tais como campo sujo, campo limpo e campo rupestre (Ribeiro; Walter, 2008). Ao passo que a Floresta Amazônica, em áreas de solo de textura arenosa podem ser observadas florestas de porte baixo, árvores esguias e campos de herbáceas que configuram as campinaranas (Fig. 1D).

Além das florestas tipicamente amazônicas e do Cerrado, no Maranhão também é verificada uma área coberta pela Caatinga na fronteira com o Piauí e, conseqüentemente, zonas transicionais entre a Caatinga e o Cerrado, como o carrasco. No Norte, a vegetação e o solo do estado irão refletir a proximidade com o Oceano Atlântico e originar os ecossistemas costeiros, como manguezais (Fig. 1E), apicuns, restingas (Fig. 1F) e dunas (Fig. 1G). No Noroeste, o Maranhão detém uma das fitofisionomias mais interessantes, a mata de cocais (Fig. 1H), uma região de transição entre os três domínios presentes no estado, a Amazônia, o Cerrado e a Caatinga.

A vegetação pode atuar de maneiras distintas na formação do solo, com destaque para a ciclagem de nutrientes, adição de matéria orgânica nos horizontes superficiais, aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes, além de contribuir na agregação do solo. Adicionalmente a vegetação pode contribuir na diminuição do impacto das gotas de chuva na superfície do solo, reduzindo as taxas de erosão e também oferecendo maior proteção contra as perdas de água por evaporação, mantendo a água por mais tempo no solo e dessa forma favorecendo as reações de hidrólise.



Figura 1. Fitofisionomias do Maranhão. A. Floresta Ombrófila Densa. B. Cerrado. C. Mata ciliar. D. Campinarana. E. Manguezal. F. Restinga. G. Dunas. H. Mata de cocais. Fotos por L. Marinho, exceto B por R. Saraiva.

2.1. Cerrado

O Cerrado é a vegetação que ocupa a maior parte do território do estado do Maranhão, com cerca de 65% da área total (Sano et al., 2008). Em muitas referências o Cerrado maranhense é denominado transicional ou ecotonal, devido a presença de limites contíguos com a vegetação de restinga, matas de transição e principalmente com a Floresta Amazônica (Silva-Moraes et al., 2019). A heterogeneidade do Cerrado do Maranhão também está relacionada à ampla extensão que ocupa, em altitudes que variam de 200 a 800 m (Feitosa, 2006).

No Cerrado maranhense estão localizadas Unidades de Conservação (UCs) conhecidas pela exuberância da paisagem, importância biológica e para a sociobiodiversidade, tais como o Parque Nacional da Chapada das Mesas, Parque Estadual do Mirador, Reserva Extrativa Chapada Limpa e parte do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba.

A despeito dos valiosos serviços ecossistêmicos oferecidos nas áreas de UCs, o Cerrado maranhense tem apenas 12,5% da área protegida. Destas, 5,7% são áreas de proteção integral, da categoria parque, e 6,8% de uso sustentável, prevalecendo as Áreas de Proteção Ambiental (Spinelli-Araújo et al., 2016).

O domínio segue ameaçado pelo avanço de projetos agropecuários, que resultaram na redução das áreas de Cerrado na região Sudeste e no Centro-Oeste, quando o uso da terra foi ampliado após a década de 50 no Brasil (Cavalcanti; Joly, 2002). Nesse contexto, o Cerrado também é conhecido como um hotspot para conservação mundial, por ser um ecossistema ameaçado com grande número de espécies endêmicas (Myers et al., 2000). Os atuais “alvos” dos grandes projetos agropecuários são as maiores áreas de vegetação contínua remanescentes do Cerrado que ocorrem em porções do Maranhão, além das áreas no Tocantins, Piauí e Bahia (Pereira; Pauli, 2016).

O panorama atual do Cerrado maranhense é um grande mosaico de formações remanescentes, fragmentos envolvidos em matriz alterada, condicionada por distúrbios antrópicos de diversos tipos (Aquino; Miranda, 2008). Tendo em vista essas alterações na paisagem, faz-se necessário a continuidade de projetos de pesquisa com ênfase no conhecimento sobre a flora, que poderão resultar na identificação de espécies com potencial econômico, medicinal, alimentar, assim como contribuir para subsidiar planos de manejo para conservação.

A diversidade florística do Cerrado pode ser reconhecida pelas variações nos tipos de formações, que podem ser florestais, savânicas e campestres. Essas formações constituem diferentes fitofisionomias, termo aplicado para a aparência geral externa da comunidade, que se relaciona com características como a estrutura, organização e arquitetura da vegetação (Walter et al., 2011).

A formação florestal se refere a áreas com dossel com predomínio de espécies arbóreas, tais como as formações de mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão. A formação savânica é definida por áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato graminoso, por exemplo, as fitofisionomias de cerrado típico, parque de cerrado, palmeiral e vereda. O termo campestre indica regiões com predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, tais como campo sujo, campo limpo e campo rupestre (Ribeiro; Walter, 2008).

Ao longo deste texto serão destacados resultados de projetos finalizados ou em andamento que resultaram em conhecimento acerca das fitofisionomias do Cerrado maranhense. Na maior parte desses trabalhos, a caracterização geral das áreas de Cerrado estudadas considera o cerrado típico como uma fitofisionomia savânica, um subtipo do cerrado *sensu stricto*, na qual predominam estratos arbóreo-arbustivos com ramificações tortuosas e geralmente há indícios de passagem do fogo; o cerradão tem estrato arbóreo com troncos retorcidos, poucas espécies decíduas na estação seca e há elementos florísticos de formação savânica; a mata de galeria é uma vegetação florestal perene que acompanha os pequenos rios e córregos, formando corredores fechados sobre o curso d'água e o cerrado rupestre, que é uma fitofisionomia savânica na qual crescem espécies herbáceas e há estratos arbóreo-arbustivos esparsos com ramificações retorcidas em afloramentos rochosos e solos bem drenados (Ribeiro; Walter, 2008).

Em levantamento de flora realizado no Parque Nacional da Chapada das Mesas (i.e. Saraiva et al., 2020), por exemplo, Fabaceae foi a família mais representativa, a qual também apresentou maior riqueza no cerradão, mata de galeria e no cerrado rupestre. Foram registradas espécies dessa família de hábito herbáceo (e.g. *Chamaecrista flexuosa* (L.) Greene), arbustivo (e.g. *Chamaecrista desvauxii* (Collad.) Killip), arbóreo (e.g. *Bowdichia virgilioides* Kunth) e trepador (e.g. *Centrosema platycarpum* Benth.). No cerrado típico e no cerrado rupestre do parque foi identificada a maior proporção de espécies endêmicas. Por outro lado, na mata de galeria e no cerrado rupestre foi verificada as maiores porcentagens de espécies exclusivas (que ocorrem somente nesta fitofisionomia), 77,59% e 73,02%, respectivamente (Saraiva et al., 2020). A exemplo disso, pode-se citar *Dyckia maranhensis* Guarçoni & Saraiva (Bromeliaceae), que ocorre somente no cerrado rupestre (Guarçoni et al., 2020).

As fitofisionomias de Cerrado mais estudadas no Maranhão quanto à fitossociologia, estrutura e composição foram o cerrado típico e o cerradão, em pesquisas realizadas em municípios, tais como Carolina, Chapadinha, Balsas, Mirador e Urbano Santos (e.g. Aquino et al., 2007; Figueiredo; Andrade, 2007; Medeiros et al., 2008; Silva et al., 2008; Conceição; Castro, 2009; Medeiros; Walter, 2012). Nessas fitofisionomias, entre as espécies com maior Índice de Valor de Importância, estavam: *Byrsonima pachyphylla* A.Juss. (Malpighiaceae), *Curatella americana* L. (Dilleniaceae),

Callisthene fasciculata Mart. (Vochysiaceae), para o cerrado sensu stricto (Medeiros et al., 2008); e *Tachigali vulgaris* L.G.Silva & H.C.Lima (Fabaceae), *Combretum mellifluum* Eichler (Combretaceae) e *Eugenia dysenterica* (Mart.) DC. (Myrtaceae) e *Plathymenia reticulata* Benth. (Fabaceae), para o cerradão (Aquino et al., 2007; Silva et al., 2008; Conceição; Castro, 2009).

Atualmente há um crescente número de pesquisas sobre a flora do estrato herbáceo-arbustivo no Cerrado maranhense (Silva et al., 2022), uma vez que a flora arbórea foi alvo de muitas pesquisas em décadas anteriores. Estudos fitossociológicos recentes consideraram esse estrato nas fitofisionomias de cerrado típico e de mata de galeria do Parque Nacional da Chapada das Mesas. Os resultados apontaram que o cerrado típico é mais homogêneo em termos de composição da vegetação e estrutura (menores valores de diversidade beta), quando comparado à mata de galeria. Em paralelo, às condições edáficas, a disponibilidade de Ca, estão significativamente relacionadas à composição e parâmetros estruturais nas duas fitofisionomias, confirmando a relação solo-vegetação no cerrado ecotonal maranhense. Na fitofisionomia de cerrado típico, *Trachypogon spicatus* (L.f.) Kuntze (Poaceae) e *Croton agoensis* Baill. (Euphorbiaceae) apresentaram os maiores valores de importância. Na mata de galeria, por sua vez, as espécies com maior valor de importância foram *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand (Burseraceae) e *Bauhinia dubia* G.Don (Fabaceae) (Saraiva et al., 2024).

Paralelamente, levantamentos taxonômicos sistemáticos no Cerrado maranhense possibilitaram descobertas de espécies até então desconhecidas para a ciência ou ampliaram a distribuição geográfica da biodiversidade, oferecendo subsídios para a formulação de políticas de conservação. Exemplos recentes desses esforços são as novas espécies endêmicas do Cerrado maranhense: *Alstroemeria maranhensis* M.C.Assis & A.W.C.Ferreira (Alstroemeriaceae) (Ferreira et al., 2024); *Dyckia maranhensis* Guarçoni & Saraiva (Bromeliaceae) (Guarçoni et al., 2020); *Dizygostemon riparius* Scatigna & Colletta (Gentianaceae) (Scatigna et al. 2019) e *Turnera carolina* M.J.C.Silva & L.Rocha (Turneraceae) (Silva et al., 2023) ressaltam a relevância de investir continuamente em pesquisas sobre as fitofisionomias do Cerrado maranhense.

2.2. Floresta Amazônica

A Floresta Amazônica concentra a maior diversidade biológica da Terra e pode ser geograficamente definida pelas bacias hidrográficas dos rios que desembocam no rio Amazonas. Embora a maior parte da Amazônia esteja localizada no Brasil, esta também inclui importantes áreas nos países vizinhos como as Guianas, Colômbia, Peru, Venezuela e Bolívia. A influência das florestas úmidas amazônicas ainda alcança grande parte dos domínios fitogeográficos vizinhos como o Cerrado e o Pantanal.

No Brasil, é utilizado como instrumento legal de delimitação do domínio Amazônico tanto as áreas de floresta, quanto às áreas de influência em outros domínios, compondo o que chamamos Amazônia Legal. A Amazônia Legal compreende aproximadamente 59% do território brasileiro (IBGE, 2022) e inclui boa parte do Pantanal mato-grossense e Cerrado do Tocantins e Maranhão. Esta região encontra-se no limite leste do domínio amazônico e está sob a linha de devastação conhecida como “Arco do Desmatamento” (Nepstad et al., 1995), a qual inclui especificidades em cada microrregião, desde o desmatamento para criação de gado ou plantio de monoculturas, até a fragmentação florestal causada pela retirada de areia.

Assim como o Cerrado, a Amazônia maranhense possui diversas fitofisionomias associadas (Oliveira; Daly, 2001) e que são definidas majoritariamente pelo tipo de solo, disponibilidade de água e precipitação. Margeando os grandes rios da região são encontradas as áreas alagadas, como várzeas e igapós, e adjacentes a estas, as matas de galeria e ciliares.

A floresta de terra firme é uma das principais formações vegetacionais da região Amazônica, ocupando a maior parte da bacia e se estendendo por vastas áreas que permanecem acima do nível das cheias dos rios durante todo o ano (Vieira, 1992; Vicentini, 2001). Essas áreas integram as regiões de Floresta Ombrófila Densa, distribuídas em terrenos mais elevados e secos (IBGE, 2012), onde predominam solos com baixa fertilidade natural (Teixeira; Smyth, 1986). O ambiente é marcado por condições climáticas tipicamente tropicais, com temperaturas elevadas (médias em torno de 25 °C) e alta pluviosidade bem distribuída ao longo do ano (IBGE, 2012).

A vegetação é composta por um estrato emergente com árvores que ultrapassam os 40 metros de altura, um dossel fechado, um sub-bosque e um estrato inferior com arbustos, plântulas, herbáceas adaptadas à baixa luminosidade, lianas e epífitas em abundância (IBGE, 2012; IBAM, 2015). Essa floresta desempenha papel vital no equilíbrio ecológico e climático da Amazônia, pois exerce um importante papel na reserva de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas globais (Marengo; Souza Júnior, 2018), além disso, participa ativamente do ciclo da água, promovendo a evapotranspiração e influenciando os regimes de chuva em escala regional e até continental. Os rios voadores — massas de ar carregadas de umidade — são em grande parte alimentados pela umidade liberada pelas árvores dessa floresta (IBAM, 2015).

As fitofisionomias de Floresta Ombrófila Densa que ocorrem em áreas de terra firme na Amazônia correspondem a regiões que não são submetidas a alagamentos sazonais e apresentam características influenciadas principalmente pela altitude, pelo tipo de solo e pelas condições microclimáticas locais. Entre os grupos vegetais mais

representativos dessas formações destacam-se espécies das famílias Vochysiaceae (como os gêneros *Erismia* Rudge e *Vochysia* Aubl.) e *Arecaceae* (especialmente o gênero *Bactris* Jacq. ex Scop.), frequentemente dominantes no sub-bosque. Já em áreas de menor altitude, são comuns espécies arbóreas de grande porte, pertencentes às famílias *Euphorbiaceae* e *Araliaceae*, que contribuem significativamente para a diversidade estrutural e ecológica dessas florestas (IBGE, 2012).

Essa vegetação é caracterizada por uma composição florística diversa e, na porção leste da Amazônia, a qual integra a região maranhense, as áreas de terra firme abrigam espécies de alto valor comercial, como maçarandubas (*Manilkara* spp., *Sapotaceae*), ipês (*Handroanthus* spp. e *Tabebuia* spp., *Bignoniaceae*), jatobás (*Hymenaea* spp., *Fabaceae*), sapucaias (*Lecythis* spp., *Lecythidaceae*) e cedro (*Cedrela odorata* L., *Meliaceae*). Entre os estados brasileiros que compõem a Amazônia Legal, o Maranhão é o que apresenta os menores índices de preservação de florestas (Celentano et al., 2017). Este bioma já perdeu cerca de 75% de sua cobertura vegetal, principalmente em decorrência do desmatamento ilegal, da expansão da fronteira agrícola e da exploração madeireira seletiva (ZEE, 2019). Essa situação evidencia a urgência de políticas públicas eficazes, ações de fiscalização ambiental e iniciativas de conservação que promovam o uso sustentável dos recursos naturais, a proteção da biodiversidade e a recuperação das áreas degradadas, garantindo a preservação das florestas de terra firme. Além destas, outras áreas integram o grupo de florestas não ou pouco inundáveis, como as campinaranas.

As campinaranas integram os chamados ecossistemas de areia branca (EABs), formações vegetacionais que se desenvolvem sobre solos predominantemente arenosos e são exclusivas do domínio Amazônico (Adeney et al. 2016). Esse tipo vegetacional ocorre no Brasil e em outros países que abrigam a Amazônia (Adeney et al. 2016). Ocupam áreas extensas e contínuas no alto curso da bacia do Rio Negro e no estado de Roraima (Anderson, 1981; Wittmann; Junk, 2016), mas no geral são áreas distribuídas em fragmentos ao longo da Bacia Amazônica (Anderson, 1981; Vicentini, 2004; Adeney et al., 2016; Fine et al., 2016), cobrindo aproximadamente 5% da área do domínio (Adeney et al., 2016).

As campinaranas são bastante heterogêneas e condicionadas ao tipo de solo, em grande parte Espodosolos, drenagem e microclima local, formando verdadeiras ilhas de diversidade, com características únicas e importantes para a biodiversidade amazônica (Anderson, 1981; Demarchi et al., 2018; Almeida et al., 2022). Por outro lado, o pequeno tamanho e o isolamento das manchas de areia branca (solos de textura arenosa) contribuem para o endemismo de espécies, apesar da relativamente baixa riqueza florística (Ter Steege et al., 2000; Demarchi et al., 2022). A vegetação que compõe as campinaranas varia em estrutura, podendo apresentar desde formações abertas com arbustos e gramíneas, até áreas mais densas, onde ocorrem árvores de pequeno a médio porte, geralmente com dossel baixo e folhagem esparsa (Oliveira; Daly 2001; IBGE, 2012).

No estado do Maranhão, essas áreas ocorrem de forma fragmentada, com manchas isoladas localizadas principalmente no noroeste do estado, abrangendo aproximadamente 100 km² nos municípios de Carutapera e Boa Vista do Gurupi, um valor subestimado considerando que a Amazônia se estende por 34% do território maranhense (ZEE, 2019). As campinaranas maranhenses apresentam grande diversidade fitofisionômica, incluindo formações florestadas, arborizadas, arbustivas e gramíneo-lenhosas. Cada uma dessas fitofisionomias está relacionada a variações na granulometria e na composição química do solo. Em áreas de transição com a vegetação arborizada, surgem poucas arvoretas raquíticas e isoladas (e.g. *Homalolepis trichilioides* (A.St.-Hil.) Devecchi & Pirani (Simaroubaceae) e *Clusia grandiflora* Splitg.), com a formação de touceiras de *Encyclia granitica* (Lindl.) Schltr. (Orchidaceae).

A vegetação arbustiva possui composição bastante uniforme e, à medida que se aproxima da vegetação herbácea, os arbustos tornam-se mais raquíticos e prostrados, cedendo espaço para espécies herbáceas, em sua maioria, das famílias Cyperaceae; Poaceae, Ochnaceae e Eriocaulaceae. Nestas áreas é comum encontrar trechos de solo exposto, geralmente causados pelo escoamento de água durante o período de alagamento. Nesses locais o solo é predominantemente arenoso e de coloração branca, com o lençol freático mais superficial, emergindo a poucos centímetros de profundidade do solo, especialmente no período chuvoso. Esse encharcamento favorece a formação de pequenos córregos temporários, nos quais há espécies palustres e aquáticas que se destacam e dominam o ambiente. Também é comum a ocorrência, ao longo de todo o ecossistema, exuberantes touceiras isoladas de buritirana (*Mauritiella armata* (Mart.) Burret, Arecaceae), como parte da vegetação característica.

No Noroeste do estado, em uma zona transicional entre a Amazônia, o Cerrado e a Caatinga ainda parte da Amazônia Legal, ocorre a mata de cocais, um tipo de vegetação quase endêmico do Maranhão com algumas manchas distribuídas no Piauí e Tocantins (Barreto et al., 2019). As matas de cocais ocorrem sobre terrenos com pouca elevação, predominantemente sobre rochas sedimentares, formada por comunidades vegetais caracterizadas pela predominância de diversas palmeiras (Barreto et al., 2019), dentre elas o babaçu (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.), a juçara (*Euterpe oleracea* Mart.), o buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.) e carnaúba (*Copernicia prunifera* (Mill.) H.E.Moore), com alto grau de endemismo (Pinheiro, 2011).

Nas várzeas e igapós, comumente chamados de alagados, as espécies são adaptadas para sobreviverem saturação hídrica periódica ou permanente, e desenvolvem em suas estruturas morfológicas e fisiológicas específicas necessárias, tais como as raízes respiratórias, caules com tecidos de reserva, mecanismos que auxiliam na troca gasosa em solos que contém uma baixa oxigenação.

As várzeas, de maneira geral, referem-se a um ecossistema composto por rios de água “branca” (e.g. Rio Solimões). O solo das florestas de várzea é caracterizado por sua heterogeneidade e fertilidade natural, resultado de uma deposição de sedimentos fluviais e flúvio marinhos durante suas cheias. Tendem a apresentar restrições em sua drenagem, o que influencia significativamente a composição florística e estrutura da vegetação (Segovia et al., 2020). Como são fertilizados anualmente devido aos nutrientes depositados durante as enchentes, as florestas de várzea apresentam boas condições para a agricultura e criação intensiva de gados em campos naturais, respeitando as limitações impostas pelo código florestal (Canto, 2007). Nesse ecossistema há abundância de palmeiras e ervas graminiformes, onde se destacam o açaí (*Euterpe oleracea*) e o buriti (*Mauritia flexuosa*). Por outro lado, os igapós são formações florestais inundadas por rios de águas claras ou pretas caracterizadas por baixos níveis de nutrientes e acidez (Lima Filho et al., 2004). Os igapós são vegetações pobres em biomassa e com relativa baixa diversidade de espécies, porém é rica em endemismos e possui.

Na microrregião da Baixada maranhense, os campos inundáveis possuem solo argiloso com grande retenção de água, onde há oferta de variados serviços ecossistêmicos, o que determinou o reconhecimento dessa área úmida como um sítio Ramsar no ano 2000 (MMA, 2016). Os campos atingem nível máximo de inundação entre os meses de abril e maio durante o período chuvoso. Por outro lado, entre novembro e dezembro, durante o período seco, ocorre o menor nível de inundação (Araújo et al., 2021). Essa sazonalidade é importante, pois está diretamente relacionada com o crescimento e decomposição da vegetação aquática (Lopes et al., 2011). As plantas aquáticas e palustres desempenham um papel fundamental nos ecossistemas dos campos inundáveis, pois diminuem os níveis de nitrogênio e fósforo dissolvidos na água (Mocelin, 2021), atuam na produção de biomassa e controle de nutrientes, logo são organismos importantes para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (Lima et al., 2011). A biodiversidade de plantas aquáticas e palustres na região Amazônica da região Nordeste é ecologicamente importante, mas ainda pouco estudada. Na região da Baixada maranhense, Barbieri e Pinto (1999) realizaram o primeiro estudo sobre plantas aquáticas no estado; Barbieri e Carreiro (2017) abordaram a ecologia de plantas aquáticas nos campos inundáveis de São Bento; Costa-Neto et al. (2002) estudaram as variáveis limnológicas de três ecossistemas aquáticos da Baixada.

Ao longo de todo o estado e associados a qualquer tipo de ambiente que possua cursos d’água ocorrem as matas de galeria e ciliares. As matas de galeria são constituídas por ambientes que sofrem uma influência direta de pequenos rios e córregos e seu solo geralmente é úmido e fértil (Ribeiro; Walter, 1998). São florestas sempre verdes onde o lençol freático se mantém próximo ou sobre a superfície do

terreno, inclusive na estação seca (Walter; Ribeiro, 1997; Ribeiro; Walter, 2008). As matas de galeria do Maranhão constituem-se como componentes importantes que atuam como corredores ecológicos que ligam os diferentes domínios.

As matas ciliares (ou florestas ripárias) são formações florestais que acompanham os cursos d'água de maior porte como dos rios das bacias do Gurupi, Pindaré, Turiaçu e Tocantins (Azevedo, 2002). Tais formações florestais atuam como zonas de amortecimento entre os corpos da água e os seus ecossistemas terrestres e possuem elevada diversidade florística com espécies típicas da Floresta Amazônica, além das espécies endêmicas comumente associadas aos ambientes ripários (Braga et al., 2014). A vegetação das florestas inundáveis possui variações estruturais relacionadas à intensidade e frequência das inundações. Nestas áreas é comum a presença de árvores de médio e grande porte como o anani *Symphonia globulifera* L.f. (Clusiaceae) e a andiroba (*Carapa guianensis* Aubl. (Meliaceae). Por fim, matas ciliares têm sido importantes para a descrição da biodiversidade, atuando como último refúgio para espécies de animais e plantas de médio e grande porte. Ao longo dos rios, também atuam como proteção natural contra o assoreamento dos cursos de água (Battilani et al., 2005).

2.3. Zonas Costeiras

O Maranhão possui a segunda maior extensão costeira do Brasil, a qual sofre forte influência dos domínios fitogeográficos adjacentes quanto à sua composição florística. A zona costeira maranhense faz parte do Litoral Amazônico ou Equatorial, o qual se estende da foz do Rio Oiapoque até o Delta do Parnaíba, na fronteira do estado do Piauí (Souza et al., 2024). O Litoral Amazônico, de maneira geral, caracteriza-se pela ocorrência de extensas áreas de manguezal. Embora seja uma faixa estreita que margeia o oceano, as zonas costeiras não são uniformes e também apresentam diversos tipos fitofisionômicos, alguns bem conhecidos, como as restingas, dunas e manguezais, e outros ainda pouco explorados como os apicuns.

No norte do Maranhão, entre o limite oeste e a Ilha de São Luís, a costa maranhense recebe influência da Floresta Amazônica e abriga uma extensa área de manguezais, a qual é contínua aos manguezais paraenses e configura-se como um Sítio Ramsar (MMA, 2016). No Maranhão, essa região está protegida sob a Área de Proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses, a qual abrange 16 municípios e mais de 2 milhões de hectares (MMA, 2016). Nesta área, como é comum nos manguezais e regiões estuarinas, os solos são limosos, pouco oxigenados e salinos, limitando a composição vegetal à espécies adaptadas a este ambiente (Souza et al. 2024). Às florestas desse tipo vegetacional, dá-se o nome popular de mangue, e grande parte do manguezal é coberto por espécies de *Rhizophora*

(Rhizophoraceae, “mangue-vermelho”), *Avicennia* (Acanthaceae, “mangue-preto”) e pelas Combretaceae: *Laguncularia racemosa* (L.) C.F.Gaertn. (“mangue-branco”) e *Conocarpus erectus* L. (“mangue-de-botão”). Estas espécies estão sujeitas ao regime diário das marés e seus processos ecológicos como polinização e dispersão são regulados pelo aspecto cíclico das marés.

As áreas de manguezais do estado são distribuídas de maneira desigual, estando também associadas à região de dunas à leste do estado e adentrando o continente por meio das margens dos rios onde há significativa variação de troca entre as águas dulcícolas e salinas. Diferentemente das florestas de mangue, mas inseridas ou limítrofe a elas, estão os apicuns, caracterizados pela pouca ou nenhuma vegetação e alta salinidade (Schaeffer-Novelli, 1995). Essas áreas são regularmente inundadas nas preamares de sizígia (Schaeffer-Novelli, 2005), sendo estas responsáveis pelo transporte de argilas e silte para fora dos apicuns, restando o material arenoso no local. Os apicuns estão expostos à luz solar intensa, condições estas que permitem apenas a colonização de espécies gramíniformes, como *Paspalum maritimum* Trin. (capim-gengibre) e *Sporobolus virginicus* (L.) Kunth (grama-da-praia), e suculentas halófitas, como *Batis maritima* L. e *Sesuvium portulacastrum* (L.) L. (beldroega-da-praia) (Braga; Marinho, 2021).

O manguezal da APA das Reentrâncias Maranhenses, a oeste, tem limite na Reserva Extrativista de Cururupu. A partir daí, o solo torna-se gradativamente com textura mais arenosa e configura as ainda pouco exploradas restingas amazônicas. Apesar de as restingas serem comumente tratadas como uma fitofisionomia associada à Mata Atlântica (Fernandes; Queiroz, 2015; Rabelo et al., 2024), a sua formação tardia, no período Quaternário, resulta em uma composição florística confluyente ao domínio adjacente. Neste caso, as restingas do Maranhão, até o limite do município de Raposa, são formalmente inseridas no domínio Amazônico e, portanto, restingas amazônicas. A despeito de ser tratada como pobre em endemismo, inúmeros estudos têm demonstrado a riqueza das restingas do Maranhão por meio de levantamentos florísticos (e.g. Araújo et al., 2016; Penha et al., 2025) e identificação de espécies notórias (e.g. Scatigna et al., 2020; Salazar-Ferreira et al., 2024; Pereira et al., 2025).

À leste do Maranhão estão as restingas e dunas com maior influência do domínio do Cerrado e espécies de ampla distribuição na costa brasileira. É nesta região que está localizado o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, uma extensão de terra de aproximadamente 302 hectares dominada por depósitos eólicos sedimentares arenosos. A maior parte do complexo Lençóis Maranhenses é formada por lagoas entremeadas às dunas e vegetação herbácea associada. Às margens das dunas ocorrem outros tipos vegetacionais como os campos de restinga, restingas arbustivas e arbóreas, florestas de cocais e matas de galeria, além de extensas áreas de manguezais (Rodrigues et al. 2019).

3. FAUNA INVERTEBRADA DO SOLO

O solo é um componente dinâmico e heterogêneo, essencial para manutenção dos ecossistemas (Lavelle, 2012; Bardgett E Putten, 2014), constituído por fatores bióticos e abióticos (Lavelle, 2012), cujos benefícios incluem as propriedades morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e biológicas próprias (Doran E Sarrantonio, 1996).

A fauna do solo é composta por organismos que vivem permanentemente no solo, desenvolvem alguma fase no solo, serapilheira ou no interstício solo-serapilheira (Aquino, 2001; Correia E Oliveira, 2000; Bardgett E Putten, 2014), e desempenham funções relevantes ao ambiente, devido as suas múltiplas interações nos ecossistemas. Para Correia (2002) E Baretta et al. (2003) esses organismos são essenciais para a funcionalidade do solo, uma vez que são sensíveis as alterações ambientais, o que viabiliza a sua utilização para aferir a qualidade do solo.

A fauna do solo é geralmente dividida e classificada em grupos para melhor entendimento da diversidade e funcionalidade dos organismos que a compõe. Uma das classificações mais utilizada refere-se as classes de tamanho corporal, que são divididas em microfauna, mesofauna e macrofauna do solo (Correia, 2000). Os organismos que compõe a microfauna são principalmente nematoides, rotíferos e protozoários que apresentam tamanho corporal de 4 μm a 100 μm , regulam as populações de fungos e bactérias, influenciando indiretamente a ciclagem de nutrientes no ambiente (Aquino, 2001). Além disso, os organismos da microfauna, atuam na modificação da estrutura do solo (Lavelle, 1996), e são presas para outras populações (Wardle, 1997; Correia E Oliveira, 2000).

A mesofauna é composta por organismos ditos reguladores tróficos da microfauna e microflora, com variação no tamanho corporal de 100 μm a 2 mm. São organismos com maior movimentação no solo ou na interface solo-serapilheira, responsáveis pelo controle de outras populações edáficas, se alimentam principalmente de matéria orgânica em decomposição e são atuantes na fragmentação de serapilheira (Brown et al., 2015). Os principais grupos dessa classe são Acari, Collembola, Diplopoda, Chilopoda, Diptera, Diplura e Protura, com maior diversidade e abundância para Acari e Collembola (Correia, 2002) importantes na função detritívora.

A macrofauna composta por organismos modificadores de propriedades físicas e químicas do solo, responsáveis pela formação de poros, galerias e túneis (Lavelle et al. 2006; Blouin et al., 2013; Oliveira et al., 2014), atuam na redistribuição de matéria orgânica e fragmentação de resíduos vegetais (Correia E Oliveira, 2000). Essa classe abrange invertebrados, com diâmetro corporal superior a 2 mm, composta por organismos fragmentadores de material vegetal, detritívoros, fitófagos, humívoros, xilófagos, predadores e herbívoros (Correia, 2002).

Dentro dessa classificação, devido as suas atribuições, maior mobilidade e atuação no interstício do solo, alguns grupos são denominados de “engenheiros do ecossistema”, pois, suas atividades modificam as propriedades físicas e a disponibilidade de recursos (Brown et al., 2001; Lavelle et al., 2006; Blouin et al., 2013).

Os organismos edáficos se relacionam a qualidade ambiental do solo, como parte ativa e sensíveis às interferências no ambiente (Baretta et al., 2003, e podem ser afetados pela quantidade e qualidade de matéria orgânica (Blouin; Vries et al., 2013; Wagg et al., 2014), temperatura (Gonçalves, 2017), textura do solo (Ayuke et al., 2011), composição vegetal (Moço et al., 2010; Korboulewsky et al., 2016; Gholami et al., 2017; Silva et al., 2019) e pelas atividades humanas (Domínguez et al., 2010; Bedano et al., 2016). Assim, esses fatores podem condicionar a abundância, riqueza e a distribuição dos organismos no espaço e no tempo, afetando principalmente as suas funções ecossistêmicas.

As primeiras observações sobre as interações ecológicas da fauna do solo ocorreram por volta da década de 80 (Anderson et al., 1983; Primavesi, 2002), quando foi iniciado os primeiros estudos que relacionavam a fauna edáfica as interações ambientais e conseqüentemente, as funções ecossistêmicas, tornando as primeiras referências da fauna do solo e dos processos de mineralização (Ingham et al., 1985) e de decomposição da matéria orgânica (Anderson et al., 1983 – Tabela 1).

Para associar a fauna do solo a uma função ecossistêmica, os grupos de invertebrados do solo são agrupados em categorias funcionais (Lavelle; Spain, 2001; Silva et al., 2013; Maggiotto et al., 2019), que são unidades gerais utilizadas para descrever a comunidade da fauna edáfica relacionando os grupos a uma funcionalidade desempenhada no ambiente (Brown et al., 2015). Os grupos funcionais podem ser definidos por categorias funcionais similares, morfológicas ou reprodutivas (Lavelle; Gilot, 1994), que exploram os mesmos recursos no ambiente.

Tabela 1. Distribuição da fauna edáfica em grupos funcionais e serviços ecossistêmicos

CATEGORIA TAXONÔMICA	GRUPO FUNCIONAL	AUTORES
Acari	Decompositores	SILVA et al., 2013.
Araneae	Predadores	MOÇO et al., 2005; DOMÍNGUEZ et al., 2010
Blattodea	Fitófagos, onívoros, detritívoros e transformadores de serapilheira	MOÇO et al., 2005.
Blattodea/Isoptera	Fitófagos, detritívoros, geófagos, rizófagos, engenheiros de ecossistemas e transformadores de serapilheira	OLIVEIRA et al., 2014. COUTO et al., 2015. CRISTALDO et al., 2016.
Chilopoda	Predador	KENNING et al., 2017; MAGGIOTTO et al., 2019.
Collembola	Decompositores, catalisadores de nutrientes e saprófagos	BERG et al., 2004; TORDOFF et al., 2008; DOMÍNGUEZ et al., 2010; YANG et al., 2012
Coleoptera	Fitófagos, detritívoros, rizófagos, predadores, parasitas e transformadores de serapilheira	POMPEO et al., 2016; GONÇALVES, 2017; BERNARDES et al., 2020.
Dermaptera	Fitófagos, onívoros, predadores e transformadores de serapilheira	BROWN et al., 2001.
Diplopoda	Detritívoro, transformador de serapilheira	ORGIAZZI et al., 2016.
Diplura	Saprófagos e predadores	SENDRA et al., 2021
Diptera	Transformadores de serapilheira, detritívoros, predadores e parasitas	RAFAEL et al., 2012
Hymenoptera (Formicidae)	Fitófagos, onívoros, detritívoros, rizófagos, engenheiros de ecossistemas e controladores de pragas	SAAD et al., 2017; MARTINS et al., 2018; VICENTE et al., 2018
Neuroptera	Predadores	BROWN et al., 2001.
Oligochaeta	Detritívoros, engenheiros de ecossistemas, transformadores de serapilheira e decompositores	AQUINO, 2001; MOÇO et al., 2010; BERNARD et al., 2012
Opillionida	Predador	BROWN et al., 2001.
Orthoptera	Fitófagos e predadores	SONG et al., 2018
Protura	Decompositores	ORGIAZZI et al., 2016.
Pseudoscorpiones	Predador	ORGIAZZI et al., 2016.
Symphyla	Saprófagos e decompositores	GOLOVATCH e LI, 2020
Thysanoptera	Predadores, saprófagos e herbívoros	MAGGIOTTO et al., 2019.

4. MICRORGANISMOS EDÁFICOS

Os microrganismos do solo são considerados os motores biogeoquímicos da pedogênese e da ciclagem de nutrientes. Ao promoverem o intemperismo biológico de minerais primários por meio da exsudação de ácidos orgânicos, sideróforos e redutases, comunidades bacterianas e fúngicas aceleram a liberação de cátions essenciais (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e de P estrutural, contribuindo para a diferenciação de horizontes e para processos específicos de formação de solos como ferralitização, podzolização e gleização em contextos específicos de clima e material de origem (Uroz et al., 2022; Nicolitch et al., 2019).

Em paralelo, polímeros extracelulares microbianos (EPS) agem como agentes cimentantes, estabilizando agregados, modulando porosidade e retenção hídrica e, assim, retroalimentando a formação de estruturas pedológicas e a proteção físico-química de matéria orgânica (Zang et al., 2024). Essa estabilização é fundamental para a formação e persistência de matéria orgânica associada a minerais (MAOM), hoje reconhecida como o maior reservatório de C estável nos solos, cuja dinâmica resulta do acoplamento entre qualidade/estequiometria do aporte orgânico, composição microbiana e reatividade de superfícies minerais (Manzoni; Cotrufo, 2024; Cotrufo et al., 2019).

Dentre os grupos fúngicos, indivíduos dos filos Ascomycota e Basidiomycota desempenham papel singular na dinâmica da matéria orgânica. Espécies desses grupos degradam compostos recalcitrantes como lignina, cutina e celulose, os quais representam frações estruturalmente complexas da serapilheira. Os Basidiomycota incluem os chamados fungos de “podridão branca” e “podridão parda”, responsáveis pela oxidação enzimática da lignina e pela liberação de carbono e nutrientes para o sistema (Baldrian, 2019; Floudas et al., 2015).

Os indivíduos do filo Ascomycota, abundantes no solo e na serapilheira recém depositada, apresentam elevada capacidade de degradação de compostos solúveis e celulósicos, acelerando os estágios iniciais da decomposição e modulando a disponibilidade de substratos para outros microrganismos (Leifheit et al., 2024). Essa complementaridade funcional entre Ascomycota e Basidiomycota é essencial para o processo de humificação, conduzindo à formação de húmus estável, um dos componentes centrais na gênese e manutenção da fertilidade dos solos.

Outro filo fúngico reconhecido por sua importância nos solos é o Glomeromycota, com a maior parte de seus 371 representantes (Goto; Jobim, 2025) reconhecidos como simbiontes vegetais, com formação de micorrizas do tipo arbuscular. Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) destacam-se pela expansão do volume de solo explorado via micélio extrarradicular, aumentando a difusão efetiva e a aquisição de P, N e micronutrientes. A ação dos FMA vai além da absorção direta. Suas hifas

transportam e organizam consórcios bacterianos especializados (inclusive fosfato-solubilizadores e fosfatases), promovendo a mineralização de P orgânico na zona hifosférica, um mecanismo recentemente elucidado em que bactérias “carreadas” ao longo das hifas elevam a disponibilidade de P para a planta e para a microbiota adjacente (Jiang et al., 2021).

Além disso, os FMA secretam a glomalina, uma glicoproteína de alta estabilidade que atua como potente agente cimentante de partículas minerais e orgânicas, favorecendo a agregação do solo e aumentando a resistência dos agregados à erosão. A glomalina está intimamente relacionada ao sequestro de carbono, pois sua recalcitrância confere ao solo um reservatório estável de C orgânico, com tempo de residência superior a outras formas de carbono microbiano (Rillig et al., 2015). Dessa forma, a ação combinada das hifas e da glomalina representa um mecanismo crucial na pedogênese, na manutenção da fertilidade e na resiliência estrutural do solo frente a perturbações antrópicas e climáticas (Son; Martinez; Kao-Kiniffin, 2024).

Evidências integrativas mostram que FMA reestruturam comunidades bacterianas do solo e elevam a disponibilidade de nutrientes em agroecossistemas de baixa fertilidade, com efeitos sobre produtividade e eficiência de uso de insumos (Han et al., 2025). Do ponto de vista pedogenético, as redes hifais e os EPS fúngicos favorecem a formação de macroagregados e a oclusão de partículas finas, mecanismos que incrementam a incorporação de necromassa microbiana à fração MAOM, fortalecendo a estabilidade estrutural e a resiliência do solo (Manzoni; Cotrufo, 2024; Zhang et al., 2024).

As bactérias fixadoras de N₂ exercem papel duplo na gênese e no funcionamento dos solos. Em simbioses clássico-leguminosas (*Rhizobium*/*Bradyrhizobium*), a entrada de N reconfigura gradientes de disponibilidade de nutrientes, altera pH rizosférico e retroage sobre taxas de intemperismo e de humificação. Já a fixação de vida livre (FLNF), mediada por diazotróficas heterotróficas e fototróficas (cianobactérias), é reconhecida como sensível ao tipo e à quantidade de carbono disponível, à estequiometria C:N:P, ao O₂, à umidade e ao regime de fertilização. Estes fatores modulam tanto a abundância da comunidade diazotrófica quanto as taxas instantâneas de fixação (Zhao et al., 2024; Dai et al., 2021; Smercina et al., 2019). Em ecossistemas e sistemas agrícolas com baixa entrada de N mineral, a FLNF pode representar fluxo relevante para o balanço de N, com implicações diretas para a pedogênese biológica (aumentando biomassa microbiana, produção de EPS e estabilização de agregados) e para a eficiência do uso de N em plantas não leguminosas (Zhao et al., 2024; Dai et al., 2021).

De forma integrada, a biogênese de agregados (via EPS microbianos e hifas de FMA), o intemperismo induzido por microrganismos e a formação de MAOM compõem um “tríplice acoplamento” que liga processos de microescala (interações célula-mineral-polímero) à evolução de propriedades de solo em escalas pedológicas. Essa perspectiva explica por que práticas de manejo que modulam entradas de C de qualidade (raízes finas, exsudatos), diversidade funcional microbiana e reatividade mineral (p.ex., textura, óxidos de Fe/Al) tendem a promover solos mais estruturados, férteis e resistentes a distúrbios — isto é, solos com pedogênese “biologicamente intensificada” e com maior capacidade de ciclagem eficiente de N e P (Manzoni; Cotrufo, 2024; Uroz et al., 2022; Cotrufo et al., 2019).

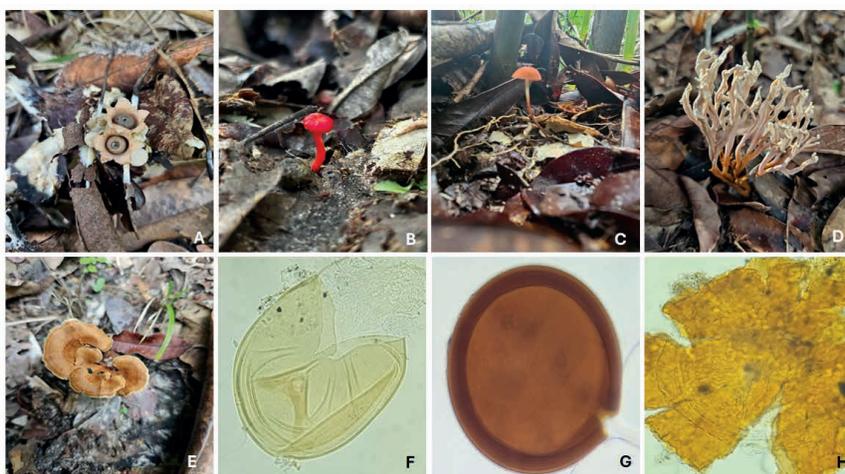


Fig. 2. Fungos decompositores e micorrízicos com ocorrência no Maranhão. A - *Geastrum* sp.; B - *Hygrocybe* sp.; C - *Mycena* sp.; D - *Clavularia* sp.; E - *Trametes* sp.; F - *Acaulospora* sp.; G - *Gigaspora* sp.; H - *Ambispora* sp.

5. 5 O HOMEM, O SOLO E O MARANHÃO

Os povos originários do Maranhão incluem as etnias Ka’apor, Guajá, Tenetehara, Timbira, Kanela, Krikati e Gamela - e 20 territórios indígenas (FUNAI, 2025), sendo 17 já demarcados (Maranhão, 2023). Os principais grupos indígenas no Maranhão são:

- Gamela: grupo que enfrenta desafios e conflitos por território e direitos.
- Guajá: grupo conhecido por sua resistência e história de contato com o mundo exterior.
- Guajajara: uma das maiores populações indígenas do Brasil, habitam diversas terras indígenas na margem oriental da Amazônia, no Maranhão.

Ka'apor: grupo que vive em áreas de floresta, com forte conexão com o meio ambiente.

Kanela: grupo que faz parte do tronco Timbira.

Krikati: grupo que também faz parte do tronco Timbira.

Tenetehara: grupo que engloba os povos Tembé e Guajajara.

Timbira: grupo que inclui os povos Apanjekrá, Gavião, Krikati e outros.

De acordo com o Censo 2022, do IBGE (2022a, 2022b), o Maranhão tinha 57.214 indígenas de diversas etnias, com 72,93% vivendo em terras indígenas, e, entretanto, 15.488 estavam fora desses territórios, vivendo em cidades ou áreas não demarcadas.

Pesquisas arqueológicas evidenciam a relação íntima entre os povos originários do Maranhão e a pedogênese do solo, representando as atuais Terras Pretas de Índio (Figura 2a) ou na presença de sambaquis (Figura 2b).



Figura 3. Terra preta de Índio (a) e sambaqui (b) no Maranhão.

Ao longo da costa atlântica e dos rios amazônicos, vários exemplos de diferentes culturas cerâmicas arcaicas do Holoceno, que dependiam da pesca e da mariscagem, foram escavados e datados entre 8.000 e 4.500 AP (Roosevelt 1999)

Os povos indígenas do Maranhão enfrentam desafios como a ameaça de desaparecimento de suas línguas nativas e a luta pela garantia de seus direitos e território. Nas Terras Baixas do leste da América do Sul a discussão ainda é incipiente.

Os maiores avanços teóricos vieram com as discussões de Roosevelt (1999) e Oliver (2001, 2008). Ambos os autores argumentam que entre 3000-2000 BP nos sítios amazônicos há uma grande quantidade de fragmentos cerâmicos que formaram vasilhas utilizadas no preparo, consumo e armazenamento de alimentos, além de outros utilizados em atividades cerimoniais que envolvia práticas mortuárias de enterramento.

De acordo com NAVARRO (2023) as estearias do Maranhão (figura 2) são sítios pré-coloniais construídos sobre palafitas na região conhecida como Baixada Maranhense, dentro da Amazônia Legal. As estearias do Maranhão estão localizadas no Golfão Maranhense, que compreende terras com cotas altimétricas baixas que favorecem a formação de lagos, fazendo que os povos indígenas do Maranhão vivessem em palafitas, pois durante a estação chuvosa o nível da água alcança cotas mais elevadas.



Figura 4. Estacas do sítio de palafitas no lago Coqueiro, município de Olinda Nova do Maranhão, que ficaram aparentes na seca de 2012 (Alexandre Guida Navarro/UFMA).

Vestígios bem preservados de seus assentamentos se espalham por cerca de 40 mil quilômetros quadrados (quase a área do estado do Rio de Janeiro) nos trechos em que os rios Pindaré, Pericumã e Turiaçu, antes de desaguar no oceano, alargam-se e inundam as planícies vizinhas no período das chuvas, que vai de janeiro a junho (FAPESP, 2019). Os sinais que restaram desse povo indicam uma ocupação de até 2 mil anos, e desapareceram antes da chegada dos europeus às Américas, indicam que eram hábeis ceramistas e provavelmente trocavam mercadorias e conhecimento com outros grupos da Amazônia e de regiões do Caribe. Chamadas de estearias, as aldeias de palafita do Maranhão são conhecidas há quase 150 anos, mas só recentemente voltaram a ser estudadas com atenção. As estearias maiores podem ter abrigado em seu auge milhares de pessoas, indica um mapeamento detalhado de quatro das quase 20 estearias da Baixada Maranhense.

Na Ilha de Upaon Açú (ilha grande na língua do povo indígena Tremembé) ou Ilha de São Luís, encontram-se diversos sítios arqueológicos que descrevem a ocupação humana neste período, formando os chamados sambaquis. Sambaquis constituem um marco paisagístico, de quando estes assentamentos foram estabelecidos em um gradiente ecológico de elevada produtividade, como os manguezais, os grupos humanos pretéritos nele assentados percorreram uma área de captação de recursos que pode ser demarcada por meio do registro zooarqueológico (ARKLEY et al. 2016).

Bandeira (2018) descreve que a primeira sequência cronológica para um sambaqui da Ilha de São Luís foi obtida em 2008, com a escavação do Sambaqui do Bacanga, permitindo identificar três momentos de ocupação no sítio: um momento inicial datado em 6.600 anos A.P., que se estendeu até cerca de 760 anos A.P. As ocupações se associaram a um período ceramista pré-sambaqueiro, que foi substituído por grupos sambaqueiros, e finalizada com uma ocupação por povos agricultores-ceramistas no período pré-colonial (BANDEIRA, 2008, 2013, 2014a).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, a formação dos solos no Maranhão é resultado direto da ação integrada entre fauna, flora e ser humano ao longo do tempo. Animais e microrganismos transformam e enriquecem o solo por meio da decomposição, ciclagem de nutrientes e modificação da estrutura física. As plantas e líquens, por sua vez, aceleram o intemperismo de rochas e aumentam a matéria orgânica, estabelecendo as bases para o desenvolvimento dos ecossistemas terrestres. A participação humana, seja nas práticas tradicionais dos povos originários ou nas atuais formas de manejo, imprime marcas que potencializam a diversidade e a fertilidade do solo. Dessa forma, fica evidente que os organismos, em suas diferentes dimensões, são agentes fundamentais para a gênese, manutenção e renovação dos solos, sustentando a riqueza ecológica e cultural do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- ADENEY, J. M.; CHRISTENSEN, N. L.; VICENTINI, A.; COHN-HAFT, M. White-sand ecosystems in Amazonia. *Biotropica*, v. 48, p. 7-23, 2016. DOI: 10.1111/btp.12293.
- ALMEIDA, M. R. N.; OLIVEIRA, I.; COSTA, J. G.; SILVA, T. T. S.; SILVA, S. S.; MELO, A. W. F. Ameaças à conservação do ecossistema das campinaranas no extremo oeste do estado do Acre. In: LIESENFELD, M. V. A. et al. (org.). *Ciências ambientais na Amazônia*. Rio Branco: Stricto Sensu, 2022.
- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, A. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. *Revista Caatinga*, v. 22, p. 126-135, 2009.
- ANDERSON, A. B. White-sand vegetation of Brazilian Amazonia. *Biotropica*, p. 199-210, 1981. DOI: 10.2307/2388125.
- ANDERSON, J. M.; INESON, P.; HUIH, S. A. The effects of animal feeding activities on element release from deciduous forest litter and soil organic matter. *New Trends in Soil Zoology*, p. 87-100, 1983.
- AQUINO, F. G.; MIRANDA, G. H. B. Consequências ambientais da fragmentação de habitats no Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (ed.). *Cerrado: ecologia e flora*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 383-395.
- AQUINO, F. G.; WALTER, B. M. T.; RIBEIRO, J. F. Espécies vegetais de uso múltiplo em Reservas Legais do Cerrado-Balsas, MA. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 5, p. 47-149, 2007.
- AQUINO, A. M. Manual para macrofauna do solo. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2001. (Documentos, 130).
- ARAÚJO, A. C. M.; SILVA, A. N. F.; ALMEIDA JUNIOR, E. B. Caracterização estrutural e status de conservação do estrato herbáceo de dunas da Praia de São Marcos, Maranhão, Brasil. *Acta Amazonica*, v. 46, p. 247-258, 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201504265.
- ARAÚJO, N. A.; BARBIERI, R. Sustentabilidade dos ecossistemas do Maranhão – Baixada Maranhense. São Paulo: Gradus Editora, 2021.
- ARAÚJO, N. A.; PINHEIRO, C. U. B. Composição florística e fitossociologia das matas de aterrados do lago Formoso no município de Penalva, Baixada Maranhense, Amazônia Legal brasileira. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 25, p. 1-12, 2012.

ARAÚJO, T. L. K.; SOUSA, P.; AZEITIRO, U. M. M.; SOARES, A. M. V. M. Brazilian Amazonia deforestation and environmental degradation: analyzing the process using game, deterrence and rational choice theories. *Environmental Science and Policy*, v. 177, p. 46-51, 2021.

AYUKE, F. O.; BRUSSAARD, L.; VANLAUWE, B.; SIX, J.; LELEI, D. K.; KIBUNJA, C. N.; PULLEMAN, M. M. Soil fertility management: impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Applied Soil Ecology*, v. 48, p. 53-62, 2011.

BALDRIAN, P. The known and the unknown in soil microbial ecology. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 95, n. 2, fiz005, 2019. DOI: 10.1093/femsec/fiz005.

BANDEIRA, A. M. Ocupações humanas pré-coloniais na Ilha de São Luís – MA: inserção dos sítios arqueológicos na paisagem, cronologia e cultura material cerâmica. 2013. 1096 f. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BANDEIRA, A. M. Ocupações humanas pré-históricas no litoral maranhense: um estudo arqueológico sobre o sambaqui do Bacanga na Ilha de São Luís-Maranhão. 2008. 371 f. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BANDEIRA, A. M. Vinhais Velho: arqueologia, história e memória. São Luís: Foto Studio Edgar Rocha, 2014.

BANERJEE, S.; HE, Y.; GUO, X.; SI, B. C. Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland: joint multifractal analysis. *Australian Journal of Crop Science*, v. 6, p. 756-763, 2011.

BARBIERI, R.; CARREIRO, J. G. Ecologia de macrófitas aquáticas em campo inundável na APA da Baixada Maranhense. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 27, p. 1-8, 2017.

BARBIERI, R.; PINTO, C. M. P. Study on the aquatic vegetation in the São Bento Country-Baixada Maranhense (Maranhão, Brazil). *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 1, p. 95-105, 1999.

BARDGETT, R. D.; PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, v. 515, p. 505-511, 2014.

BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P.; MAFRA, A. L.; WILDNER, L. P.; MIQUELLUTI, D. J. Fauna edáfica avaliada por armadilhas de catação manual afetada pelo manejo do solo na região oeste catarinense. *Revista de Ciência Agroveterinária*, v. 2, p. 97-106, 2003.

BARRETO, H. N.; PARISE, C. K.; ALMEIDA JÚNIOR, E. B. The Cocais Forest Landscape. In: SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C.; PAISANI, J. L. (ed.). *The Physical Geography of Brazil*. Berlin: Springer Nature, 2019.

BATTILANI, J. L.; DIAS, E. S.; SOUZA, A. L. T. Fitossociologia de um trecho da mata ciliar do rio da Prata, Jardim, MS, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 19, p. 597-608, 2005. DOI: 10.1590/S0102-33062005000300021.

BEDANO, J. C.; DOMÍNGUEZ, A.; AROLFO, R.; WALL, L. G. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. *Soil and Tillage Research*, v. 158, p. 100-109, 2016.

BERG, M. P.; STOFFER, M.; VAN DEN HEUVEL, H. H. Feeding guilds in Collembola based on digestive enzymes. *Pedobiologia*, v. 48, p. 589-601, 2004.

BLOUIN, M.; HODSON, M. E.; DELGADO, E. A.; BAKER, G.; BRUSSAARD, L.; BUTT, K. R.; et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, v. 64, p. 161-182, 2013.

BRAGA, K. B.; MARINHO, L. C. Similar, but not too similar: succulent plants on Carimã Beach, Maranhão, Brazil. *Haseltonia*, v. 31, p. 43-48, 2024. DOI: 10.2985/026.031.0106.

BROWN, G. G.; FRAGOSO, C.; BAROIS, I.; ROJAS, P.; PATRÓN, J. C.; BUENO, J.; MORENO, A. G.; et al. Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica em los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana*, p. 79-110, 2001.

BROWN, G. G.; NIVA, C. C.; ZAGATTO, M. R. G.; FERREIRA, S. A.; NADOLNY, H. S.; CARDOSO, G. B. X.; SANTOS, A.; et al. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L. M. et al. (org.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília: Embrapa, 2015. p. 122-154.

CANTO, O. *Várzea e varzeiros da Amazônia*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2007.

CAVALCANTI, R. B.; JOLY, C. A. Biodiversity and conservation priorities in the Cerrado region. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (ed.). *The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical Savanna*. New York: Columbia University Press, 2002. p. 351-367.

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G.; MUNIZ, F.; VARGA, I.; MARTINEZ, C.; CARNEIRO, M.; MIRANDA, M.; et al. Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. *Land Use Policy*, v. 68, p. 692-698, 2017. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.07.041.

CONCEIÇÃO, G. M.; CASTRO, A. A. J. F. Fitossociologia de uma área de cerrado marginal, Parque Estadual do Mirador, Mirador, Maranhão. *Scientia Plena*, v. 5, p. 1-14, 2009.

CONIEGO, F. J.; ESPEJO, R.; MARTÍN, M. A.; SAN JOSÉ, F. Multifractal scaling of soil spatial variability. *Ecological Modelling*, v. 182, p. 291-301, 2005.

CORREIA, M. E. F. Potencial de utilização dos atributos das comunidades de fauna de solo e de grupos chave de invertebrados como bioindicadores de manejo do ecossistema. *Seropédica: Embrapa Agrobiologia*, 2002. p. 23.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. Fauna do solo: aspectos gerais e metodológicos. *Seropédica: Embrapa Agrobiologia*, 2000. p. 46.

COSTA-NETO, J. P.; BARBIERI, R.; IBAÑEZ, M. S. R.; CAVALCANTE, P. R. S.; PIORSKI, N. M. Limnologia de três ecossistemas aquáticos característicos da Baixada Maranhense. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 15, p. 19-38, 2002.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, v. 12, p. 989-994, 2019. DOI: 10.1038/s41561-019-0484-6.

COUTO, A. A. V. O.; ALBURQUERQUE, A. C.; VASCONCELLOS, A.; CASTRO, C. C. Termite assemblages (Blattodea: Isoptera) in a habitat humidity gradient in the semiarid region of northeastern Brazil. *Zoologia*, v. 32, p. 281-288, 2015.

CRISTALDO, P. F.; RODRIGUES, V. B.; ELLIOT, S. L.; ARAÚJO, A. P. A.; SOUZA, O. D. Heterospecific detection of host alarm cues by an inquiline termite species (Blattodea: Isoptera: Termitidae). *Animal Behaviour*, v. 120, p. 43-49, 2016.

DAI, X.; SONG, D.; GUI, Q.; ZHOU, W.; LIU, G. et al. Predicting the influence of fertilization regimes on potential N fixation through their effect on free-living diazotrophic community structure in double rice cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 156, p. 108220, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108220>.

DEMARCHI, L. O.; KLEIN, V. P.; AGUIAR, D. P. P.; MARINHO, L. C.; FERREIRA, M. J.; LOPES, A.; CRUZ, J.; QUARESMA, A. C.; SCHONGART, J.; WITTMANN, F.; PIEDADE, M. T. F. The specialized white-sand flora of the Uatumã Sustainable Development Reserve, central Amazon, Brazil. *Check List*, v. 18, p. 187-217, 2022. DOI: 10.15560/18.1.187.

DEMARCHI, L. O.; SCUDELLER, V. V.; MOURA, L. C.; DIAS-TERCEIRO, R. G.; LOPES, A.; WITTMANN, F. K.; PIEDADE, M. T. F. Floristic composition, structure and soil-vegetation relations in three white-sand soil patches in central Amazonia. *Acta Amazonica*, v. 48, p. 46-56, 2018. DOI: 10.1590/1809-4392201603523.

DOMÍNGUEZ, A.; BEDANO, J. C.; BECKER, A. R.; AROLFO, R. V. Organic farming fosters agroecosystem functioning in Argentinian temperate soils: evidence from litter decomposition and soil fauna. *Applied Soil Ecology*, v. 83, p. 170-176, 2010.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. Soil health and sustainability. In: SPARKS, D. L. (org.). *Advances in Agronomy*. San Diego: Academic Press, 1996. p. 1-54.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). O povo das águas. *Revista Pesquisa Fapesp*, 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-povo-das-aguas/>. Acesso em: 2 set. 2025.

FEITOSA, A. C. Relevô do Estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA; REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 2006. Anais [...]. 2006. p. 1-11.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Floristic surveys of Restinga Forests in southern Bahia, Brazil, reveal the effects of geography on community composition. *Rodriguésia*, v. 66, p. 51-73, 2015. DOI: 10.1590/2175-7860201566104.

FERREIRA, A. W. C.; SILVA JÚNIOR, W. R.; SILVA, M. J. C.; OLIVEIRA, M. S.; ASSIS, M. C. *Alstroemeria maranhensis* (Alstroemeriaceae): a new species from the Cerrado of Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 38, e20230162, 2024. DOI: 10.1590/1677-941X-ABB-2023-0162.

FIGUEIREDO, N.; ANDRADE, G. V. Estrutura e composição florística da vegetação de um Cerradão. In: BARRETO, L. (org.). *Cerrado Norte do Brasil*. Pelotas: Ed. USEB, 2007.

FINE, P. V. A.; BRUNA, E. M. Neotropical white-sand forests: origins, ecology and conservation of a unique rain forest environment. *Biotropica*, v. 48, p. 5-6, 2016. DOI: 10.1111/btp.12305.

FLOUDAS, D.; HELD, B. W.; RILEY, R.; NAGY, L. G. et al. Evolution of novel wood decay mechanisms in Agaricales revealed by the genome sequences of *Fistulina hepatica* and *Cylindrobasidium torrendii*. *Fungal Genetics and Biology*, v. 76, p. 78-92, 2015.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS (FUNAI). Quem são os povos indígenas. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/povos-indigenas/quem-sao>. Acesso em: 2 set. 2025.

GHOLAMI, S. H.; MAHINI, A. S.; HOSSEINI, S. M.; MOHAMMADI, J.; SAYAD, E. Assessment of vegetation density and soil macrofauna relationship in riparian forest of Karkhe River for determination of rivers buffer zone. *Iranian Journal Applied Ecology*, v. 7, p. 13-26, 2014.

GHOLAMI, S. H.; SAYAD, E.; GEBBERS, R.; SCHIRRMANN, M.; JOSCHKO, M.; TIMMER, J. Spatial analysis of riparian forest soil macrofauna and its relation to abiotic soil properties. *Pedobiologia*, v. 59, p. 27-36, 2017.

GONÇALVES, M. P. G. Relação entre tempo e besouros em mata de cocal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 543-554, 2017.

GOTO, B. T.; JOBIM, K. Mycorrhizal Biology Laboratory. Disponível em: <http://glomeromycota.wixsite.com/lbmicorrhizas>. Acesso em: 28 jul. 2025.

GUARÇONI, E. A. E.; SARAIVA, R. V. C.; FERRAZ, T. M. *Dyckia maranhensis* (Bromeliaceae, Pitcairnioideae), a new species from the Cerrado of Maranhão, northeastern Brazil. *Systematic Botany*, v. 45, p. 47-52, 2020. DOI: 10.1600/036364420X15801369352289.

HAN, Y.; YUAN, G.; YANG, X.; FANG, L.; LIANG, Y.; ZHOU, B.; WEI, Z. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil nutrient cycling by regulating soil bacterial community structures in mango orchards with different soil fertility rates. *Frontiers in Microbiology*, v. 16, p. 1615694, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1615694>.

IBAM, Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Caderno de estudo: bioma Amazônia e o desmatamento. Rio de Janeiro: IBAM, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2012. p. 271.

IBGE. Tabela 9718: população residente, total e indígena, por localização do domicílio e quesito de declaração indígena nos Censos Demográficos – Primeiros Resultados do Universo. 2022a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 7 ago. 2023.

IBGE. Panorama do Censo 2022. 2022b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 7 ago. 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão Regional – Amazônia Legal. In: Quadro Geográfico de Referência para Produção, Análise e Disseminação de Estatísticas. Brasília: IBGE, 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Brasília: IBGE, 2012.

INGHAM, R. E.; TROFYMOW, J. A.; INGHAM, E. R.; COLEMAN, D. C. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecology Monographs*, v. 55, p. 119-140, 1985.

JIANG, F.; ZHANG, L.; ZHOU, J.; GEORGE, T. S.; FENG, G. AMF enhance mineralisation of organic P by carrying bacteria along extraradical hyphae. *New Phytologist*, v. 230, p. 304–315, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.1708>.

KENNING, M.; MÜLLER, C. H. G.; SOMBKE, A. The ultimate legs of Chilopoda (Myriapoda): a review on their morphological disparity and functional variability. *PeerJ*, 5:e4023, 2017.

KORBOULEWSKY, N.; PEREZ, G.; CHAUVAT, M. How tree diversity affects soil fauna diversity: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 94, p. 94-106, 2016.

LAVELLE, P. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, v. 33, p. 3-16, 1996.

LAVELLE, P. Soil as habitat. In: WALL, D. H. (ed.). *Soil ecology and ecosystem services*. New York: Oxford University Press, v. 1, p. 7-27, 2012.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, v. 42, p. 3-15, 2006.

LAVELLE, P.; GILOT, C. Priming effects of macroorganisms on microflora: a key process of soil function? In: *Beyond the Biomass*. 1994. p. 176-181.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. V. *Soil ecology*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p. 654.

LEIFHEIT, E. F.; CAMENZIND, T.; LEHMANN, A.; ANDRADE-LINARES, D. R.; FUSSAN, M.; WESTHUSEN, S.; WINEBERGER, T. M.; RILLIG, M. C. Fungal traits help to understand the decomposition of simple and complex plant litter. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 10, n. 100(5), fiae033, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae033>.

LIMA, L. F.; SILVA, S. S. L.; MOURA-JÚNIOR, E. G.; ZICKEL, C. S. Composição florística e chave de identificação das macrófitas aquáticas ocorrentes em reservatórios do estado de Pernambuco. *Rodriguésia*, v. 62, p. 771-783, 2011. DOI: 10.1590/S2175-78602011000400006.

LIMA, L. P. Z. Caracterização multitemporal das planícies de inundações dos rios Grande e Aiuruoca através da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Lavras: UFLA, 2010.

LIMA, G. P.; ALMEIDA JR., E. B. Diversidade e similaridade florística de uma restinga ecotonal no Maranhão, Nordeste do Brasil. *Interciência*, v. 43, p. 275-282, 2018.

LOPES, A.; PAULA, J. D.; MARDEGAN, S. F.; HAMADA, N.; PIEDADE, M. T. F. Influência do hábitat na estrutura da comunidade de macroinvertebrados aquáticos associados às raízes de *Eichhornia crassipes* na região do Lago Catalão, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*, v. 41, p. 493-502, 2011.

MANZONI, S.; COTRUFO, M. F. Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter – insights from modeling in phase space. *Biogeosciences*, v. 21, p. 4077–4098, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024>.

MARANHÃO. Proteção e direitos dos povos indígenas são assegurados pelo governo do Maranhão. 2023. Disponível em: <https://www.ma.gov.br/noticias/protecao-e-direitos-dos-povos-indigenas-sao-assegurados-pelo-governo-do-maranhao>. Acesso em: 2 set. 2025.

MARENGO, J. A.; SOUZA JÚNIOR, C. Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: ALANA, 2018.

MARTINS, M. B.; OLIVEIRA, T. G. Amazônia Maranhense: diversidade e conservação. Belém: MPEG, 2011.

MATHERON, G. La théorie des variables régionalisées et ses applications. École des Mines de Paris, Fontainebleau, 1971.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MEDEIROS, M. B.; WALTER, B. M. T.; SILVA, G. P. Fitossociologia do cerrado stricto sensu no município de Carolina, MA, Brasil. *Cerne*, v. 14, p. 285-294, 2008.

MEDEIROS, M. B.; WALTER, B. M. T. Composição e estrutura de comunidades arbóreas de cerrado stricto sensu no norte do Tocantins e sul do Maranhão. *Revista Árvore*, v. 36, p. 673-683, 2012.

MELO, F. V.; BROWN, G. G.; CONSTATINO, R.; LOUZADA, J. N. C.; LUIZÃO, F. ZANETT, R. A importância da meso e macrofauna do solo na fertilidade e como bioindicadores. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 39-43, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Mapeamento do uso e cobertura do cerrado: Projeto Terra Class Cerrado 2013. 2015.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Sítio Ramsar APA das Reentrâncias Maranhenses (MA) – Planejamento para o sucesso de conservação. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/53-biodiversidade-aquatica.html?start=20>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MOCELIN, C. M. Potencial emprego de macrófitas na remoção de nitrogênio e fósforo em águas residuárias no Rio Grande do Sul [Trabalho de Conclusão de Curso]. Chapecó: Universidade Federal da Fronteira Sul, 2021.

MOÇO, M. K.; GAMA-RODRIGUES, E.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Applied Soil Ecology*, v. 46, p. 347-354, 2010.

MOÇO, M. K. S.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA RODRIGUES, A. C.; CORREIA, M. E. F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 555-564, 2005.

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

NAVARRO, A. G. Ancestral Waters: Material culture, notion of transformation and shamanism in the stilt villages in Eastern Amazonia. *Cambridge Archaeological Journal*, v. 33, p. 1-18, 2023.

NEPSTAD, D. C.; JIPP, P.; MOUTINHO, P.; NEGREIROS, G.; VIEIRA, S. Forest recovery following pasture abandonment in Amazonia: canopy seasonality, fire resistance and ants. In: *Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystems*. Berlin Heidelberg: Springer, 1995.

NICOLITCH, O.; FEUCHEROLLES, M.; CHURIN, J. L.; FAUCHERY, L.; TURPAULT, M.-P.; UROZ, S. A microcosm approach highlights the response of soil mineral weathering bacterial communities to an increase of K and Mg availability. *Scientific Reports*, v. 9, n. 14403, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50730-y>.

OLIVEIRA, A. A.; DALY, D. *Florestas do Rio Negro*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

OLIVEIRA, F. S.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BOULANGÉ, B. The role of biological agents in the microstructural and mineralogical transformations in aluminium lateritic deposit in Central Brazil. *Geoderma*, v. 226, p. 250-259, 2014.

OLIVER, J. R. The archaeology of forest foraging and agricultural production in Amazonia. In: EWAN, C.; BARRETO, C.; NEVES, E. Unknown Amazon. Londres: British Museum Press, 2001. p. 50-85.

OLIVER, J. R. The archaeology of the agriculture in the ancient Amazonia. In: SILVERMAN, H.; ISBELL, W. Handbook of South American Archaeology. New York: Springer, 2008. p. 185-216.

ORGIAZZI, A.; BARDGETT, R. D.; BARRIOS, E.; BEHAN-PELLETIER, V.; BRIONES, M. J. I.; CHOTTE, J. L. et al. Global Soil Biodiversity Atlas. Luxembourg: European Commission Publications Office of the European Union, 2016. p. 176.

PENHA, J. C. A.; ALVES, N. P. F.; NUNES, M. S.; SILVA, M. J. C.; CARDOSO NETO, V. R.; PESTANA, M. C. A.; FERREIRA, A. W. C.; SARAIVA, R. V. C. Floristics of the herbaceous-shrub vegetation in the restinga of Araoca Beach, municipality of Guimarães, Maranhão, Northeast Brazil. *Biota Neotropica*, v. 25, e20241663, 2025. DOI: 10.1590/1676-0611-BN-2024-1663.

PEREIRA, E.; ROSSINI, Y.; PIMENTA, K. M.; ATHIÊ-SOUZA, S. M.; MARINHO, L. C. *Croton ludovicensis* (Euphorbiaceae), a new species from the coast of Maranhão state, Brazil. *Nod Journal of Botany*, 2025; e04735. DOI: 10.1002/njb.04735.

PEREIRA, L. I.; PAULI, L. O. O processo de estrangeirização da terra e expansão do agronegócio na região do MATOPIBA. *Revista Campo Território*, v. 11, p. 196-224, 2016. DOI: 10.14393/RCT112307.

PINHEIRO, C. U. B. *Palmeiras do Maranhão: onde canta o sabiá*. São Luís: Editora Aquarela, 2011.

POMPEO, P. N.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; BARETTA, C. R. D. M.; BARETTA, D. Diversidade de Coleoptera (Arthropoda: Insecta) e atributos edáficos em sistemas de uso do solo no Planalto Catarinense. *Revista Scientia Agraria*, v. 17, p. 16-28, 2016.

PRIMAVESI, A. *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. São Paulo: Nobel, 2002. p. 541.

RABELO, S. T.; FERNANDES, M. F.; MORO, M. F. Biogeography of restinga vegetation in Northern and Northeastern Brazil and their floristic relationships with adjacent ecosystems. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 96, e20230925, 2024. DOI: 10.1590/0001-3765202420230925.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F., editores. *Cerrado: ecologia e flora*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P., editores. Cerrado: ambiente e flora. Brasília: Embrapa Cerrados, 1998.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. Cerrado: ecologia e flora. Brasília: Embrapa-Cerrados, 2008. p. 876.

RIBEIRO, S.; MOURA, R. G.; STENERT, C.; FLORÍN, M.; MALTCHIK, L. Land use in Brazilian continental wetland Ramsar sites. *Land Use Policy*, v. 99, p. 104851, 2020.

RILLIG, M. C.; AGUILAR-TRIGUEROS, C. A.; BERGMANN, J.; VERBRUGGEN, E.; VERESOGU, S. D.; LEHMANN, A. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist*, v. 205, p. 1385-1388, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13045>.

RODRIGUES, M. L.; MOTA, N. F. O.; VIANA, P. L.; KOCH, A. K.; SECCO, R. S. Vascular flora of Lençóis Maranhenses National Park, Maranhão State, Brazil: checklist, floristic affinities and phytophysiognomies of restingas in the municipality of Barreirinhas. *Acta Botanica Brasílica*, v. 33, p. 498-516, 2019. DOI: 10.1590/0102-33062018abb0421.

ROOSEVELT, A. C. The Maritime-Highland-Forest Dynamic and the Origins of Complex Society. In: SOLOMON, F.; SCHWARTZ, S., eds. *History of the Native Peoples of the Americas. South America, Part 1*. New York: Cambridge University Press, 1999. p. 264-349.

SAAD, L. P.; CAMPANA, D. R. S.; BUENO, O. C.; MORINI, M. S. C. Vinasse and its influence on ant (Hymenoptera: Formicidae) communities in sugarcane crops. *Journal of Insect Science*, v. 17, p. 1-7, 2017.

SALAZAR-FERREIRA, M.; SILVA, F. A.; SCATIGNA, A. V.; MARINHO, L. C. The recently described *Ruellia taboleirana* (Acanthaceae) found in Maranhão, Brazil: new data on morphology, ecology and conservation. *Kew Bulletin*, v. 79, p. 243-250, 2024. DOI: 10.1007/s12225-024-10169-5.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, p. 153-156, 2008. DOI: 10.1590/S0100-204X2008000100020.

SANO, E. E.; ROSA, R.; SCARAMUZZA, C. A. M.; ADAMI, M.; BOLFE, E. L.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 54, p. e00138, 2019.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 828-835, 2012.

SARAIVA, R. V. C.; LEONEL, L. V.; REIS, F. F.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; REIS, F. O.; SOUSA, J. R. P.; MUNIZ, F. H.; FERRAZ, T. M. Cerrado physiognomies in Chapada das Mesas National Park (Maranhão, Brazil) revealed by patterns of floristic similarity and relationships in a transition zone. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, e20181109, 2020. DOI: 10.1590/0001-3765202020181109.

SARAIVA, R. V. C. Soil-vegetation relationships influence the regeneration after fire in the species composition and structural parameters of Cerrado-Amazonia ecotone. *Acta Botanica Brasílica*, v. 38, e20230169, 2024. DOI: 10.1590/1677-941X-ABB-2023-0169.

SCATIGNA, A. V.; BRANDÃO, C. M.; COLLETTA, G. D.; TELES, R. M.; CAVALCANTE, K. S. B.; SOUZA, V. C.; SIMÕES, A. O. *Dizygostemon riparius* (Plantaginaceae, Gratioleae), a new species from Maranhão, northeastern Brazil. *Willdenowia*, v. 49, p. 177-186, 2019. DOI: 10.3372/wi.49.49206.

SCATIGNA, A. V.; SARAIVA, R. V. C.; COUTO, A. F. M.; SOUZA, V. C.; MUNIZ, F. H. *Buchnera nordestina* (Orobanchaceae), an overlooked new species from Northeast Brazil, with an updated identification key for *Buchnera* of Brazil. *Acta Botanica Brasílica*, v. 34, p. 789-795, 2020. DOI: 10.1590/0102-33062020abb0333.

SEGOVIA, J. O.; ORELLANA, J. B. P.; KANZAKI, L. I. B. Características físico-químicas dos principais solos na Amazônia. In: SEGOVIA, J. F. O., editor. *Floricultura tropical: técnicas e inovações para negócios sustentáveis na Amazônia*. Brasília: Embrapa, 2020.

SENDRA, A.; JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; SELFA, J.; REBOLEIRA, A. S. P. Diversity, ecology, distribution and biogeography of *Diplura*. *Insect Conservation and Diversity*, p. 1-11, 2021.

SILVA, H. G.; FIGUEIREDO, N.; ANDRADE, G. V. Estrutura da vegetação de um Cerradão e a heterogeneidade regional do Cerrado no Maranhão, Brasil. *Revista Árvore*, v. 32, p. 921-930, 2008. DOI: 10.1590/S0100-67622008000500017.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; CELENTANO, D.; ALVARADO, S.; ROUSSEAU, G. X. Northeast Brazil's imperiled Cerrado. *Science*, v. 372, p. 139-140, 2021.

SILVA, M. J. C.; ROCHA, L.; FERREIRA, A. W. C.; SCATIGNA, A. V.; MARINHO, L. C. *Turnera carolina* (Turneraceae, Passifloraceae s.l.): a new species from Chapada das Mesas, Maranhão, Northeastern Brazil. *Systematic Botany*, v. 48, p. 300-306, 2023. DOI: 10.1600/036364423X16847773873152.

SILVA, M. S.; REIS, T. O.; SILVA, L. O.; CORREIA, A. E.; COUTO, A. F. M.; SARAIVA, R. V. C.; MUNIZ, F. H. Conhecendo a flora herbáceo-subarbusciva do Parque Estadual do Mirador, Maranhão/Brasil. *Iheringia, Série Botânica*, v. 77, e2022002, 2022. DOI: 10.21826/2446-82312022v77e2022002.

SILVA, C. F.; PEREIRA, G. H. A.; PEREIRA, M. G.; SILVA, A. N.; MENEZES, L. F. T. Fauna edáfica em área periodicamente inundável na Restinga da Marambaia, RJ. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 587-595, 2013.

SILVA, R. A.; AGUIAR, A. C. F.; REBÊLO, J. M. M.; FRANÇA E SILVA, Ê. F.; SILVA, G. F.; SIQUEIRA, G. M. Diversity of edaphic fauna in different soil occupation systems. *Revista Caatinga*, v. 32, p. 647-657, 2019.

SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil fauna diversity indexes. *Bragantia*, v. 79, p. 120-133, 2020.

SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M.; COSTA, M. K. L.; GUEDES FILHO, O.; FRANÇA E SILVA, Ê. F. Spatial variability of soil fauna under different land use and managements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, p. 1-18, 2018.

SILVA-MORAES, H. G.; CORDEIRO, I.; FIGUEIREDO, N. Flora and floristic affinities of the Cerrados of Maranhão State, Brazil. *Edinburgh Journal of Botany*, v. 76, p. 1-21, 2019. DOI: 10.1017/S0960428618000215.

SIQUEIRA, G. M.; DAFONTE, J. L.; LEMA, J. B.; ARMESTO, M. V.; SILVA, E. F. F. Using soil apparent electrical conductivity to optimize sampling of soil penetration resistance and to improve the estimations of spatial patterns of soil compaction. *The Scientific World Journal*, p. 1-13, 2014.

SIQUEIRA, G. M.; DAFONTE, J.; PAZ GONZÁLEZ, A.; ARMESTO, M. V.; SILVA, E. F. F.; COSTA, M. K. L.; SILVA, R. A. Measurement of apparent electrical conductivity of soil and the spatial variability of soil chemical properties by electromagnetic induction. *African Journal of Agricultural Research*, v. 39, p. 3751-3762, 2016.

SIQUEIRA, G. M.; DAFONTE, J.; VALCÁRCEL ARMESTO, M. Correlación espacial entre malas hierbas en una pradera y su relación con la conductividad eléctrica aparente del suelo. *Planta Daninha*, v. 33, p. 631-641, 2015.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; DAFONTE, J. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. *Bragantia*, v. 74, p. 215-223, 2015.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. *Biosystems Engineering*, v. 168, p. 105-120, 2018.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, J. S.; BEZERRA, J. M.; DAFONTE, J.; MELO, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodosolo Humilúvico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 439-448, 2015.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, R. A.; AGUIAR, A. C. F.; COSTA, M. K. L.; SILVA, E. F. F. Spatial variability of weeds in an Oxisol under no-tillage system. *African Journal of Agricultural Research*, v. 29, p. 2569-2576, 2016.

SMERCINA, D. N.; EVANS, S. E.; FRIESEN, M. L.; TIEMANN, L. K. To Fix or Not To Fix: Controls on Free-Living Nitrogen Fixation in the Rhizosphere. *Applied Environmental Microbiology*, v. 85, n. 6, p. e02546-18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02546-18>.

SON, Y.; MARTÍNEZ, C. E.; KAO-KNIFFIN, J. Three important roles and chemical properties of glomalin-related soil protein. *Frontiers in Soil Science*, v. 4, p. 1418072, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1418072>.

SONG, H.; MARIÑO-PÉREZ, R.; WOLLER, D.; CIGLIANO, M. M. Evolution, Diversification, and Biogeography of Grasshoppers (Orthoptera: Acrididae). *Insect Systematics and Diversity*, v. 2, p. 1–25, 2018.

SOUZA, V. C.; SAMPAIO, D.; TOLEDO, C. P.; FLORES, T. B.; COLLETTA, G. D. Guia das plantas das dunas e restingas. Piracicaba: Liana Produções Editoriais, 2024.

SPINELLI-ARAÚJO, L. S.; SILVA, G. B. S.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D. C.; VICENTE, L. C.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. Conservação da biodiversidade do estado do Maranhão: cenário atual em dados geoespaciais. Brasília: Embrapa, 2016. p. 26.

TEIXEIRA, S. M.; SMYTH, T. J. Análise econômica da adubação fosfatada para sistemas de produção de milho e caupi em cultivos sucessivos em solos de terra firme do Estado do Amazonas. In: Simpósio do Trópico Úmido. Belém: Embrapa-CPATU, 1986.

TER STEEGE, H. et al. An analysis of the floristic composition and diversity of Amazonian forests including those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, v. 16, p. 801-828, 2000. DOI: [10.1017/S0266467400001735](https://doi.org/10.1017/S0266467400001735).

TORDOFF, G. M.; BODDY, L.; JONES, T. H. Species-specific impacts of Collembola grazing on fungal foraging ecology. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 40, p. 434-442, 2008.

UROZ, S.; PICARD, L.; TURPAULT, M.-P. Recent progress in understanding the ecology and molecular genetics of soil mineral weathering bacteria. *Trends in Microbiology*, v. 30, n. 9, p. 882-897, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2022.01.019>.

VICENTE, R.E.; FERREIRA, A.C.; SANTOS, R.C.L.; PRADO, L.P. Ants (Hymenoptera: Formicidae) from an Amazonian fragmented landscape, Juara, Mato Grosso, Brazil, with new records of ant species. *Papéis Avulsos Zoologia*, v. 58, p. e20185840, 2018.

VICENTINI, A. A vegetação ao longo de um gradiente edáfico no Parque Nacional do Jaú. In: BORGES, S.H.; IWANAGA, S.; DURIGAN, C.C.; PINHEIRO, M.R., eds. *Janelas para a biodiversidade no Parque Nacional do Jaú: uma estratégia para o estudo da biodiversidade na Amazônia*. Manaus: Fundação Vitória Amazônica/WWF/IBAMA, 2004.

VICENTINI, A. As florestas de terra-firme. In: OLIVEIRA, A.A.; DALY, D., eds. *Florestas do Rio Negro*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

VIDAL VÁZQUEZ, E.; BERTOL, I.; SIQUEIRA, G.M.; PAZ FERREIRO, J.; DAFONTE DAFONTE, J. Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. *Bragantia*, v. 69, p. 141-152, 2010.

VIDAL VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O.A.; VIEIRA, S.R.; MIRANDA, J.G.V.; MENK, J.R.F.; SIQUEIRA, G.M.; MIRÁS-AVALOS, J.M.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. *Vadose Zone Journal*, v. 12, p. 1-14, 2013.

VIEIRA, R.S. *Várzea Amazônicas e a legislação ambiental brasileira*. Manaus: INPA, 1992.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, G.R., eds. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 54.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, v. 51, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; LAURIE, M.A.G.; PAZ GONZÁLEZ, A.; SIQUEIRA, G.M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. *Bragantia*, v. 69, p. 181-190, 2010.

VRIES, F.T.; THÉBAULT, E.; LIIRI, M.; BIRKHOFER, K.; TSIAFOULI, M.A.; BJØRNLUND, L. et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, v. 110, p. 14296-14301, 2013.

WAGG, C.; BENDER, S.F.; WIDMER, F.; VAN DER HEIJDEN, M.G.A. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, v. 111, p. 5266-5270, 2014.

WALTER, B.M.T.; DURIGAN, G.; MUNHOZ, C.B.R.; RIBEIRO, J.F. Fitofisionomias do Cerrado: classificação, métodos e amostragens fitossociológicas. In: EISENLOHR, P.V. et al., eds. *Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos*. Viçosa: Editora UFV, 2011.

WALTER, B.M.T.; RIBEIRO, J.F. Spatial floristic patterns in gallery forests in the Cerrado Region, Brazil. In: IMAÑA-ENCINAS, K.; KLEINN, C., orgs. *International Symposium on Assessment and Monitoring of Forests in Tropical Dry Regions with Special Reference to Gallery Forests*. Brasília: Universidade de Brasília, 1997.

WARDLE, D.A.; LAVELLE, P. Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. In: CADISCH, G.; GILLER, K.E., eds. *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. Cambridge: CAB International, 1997. p. 107-124.

WITTMANN, F.; JUNK, W.J. The Amazon river basin. In: FINLAYSON, C.M.; MILTON, G.R.; PRENTICE, R.C.; DAVIDSON, N.K., eds. *The Wetland book II: Distribution, description and conservation*. Springer, 2016.

YANG, X.; YANG, Z.; WARREN, M.W.; CHEN, J. Mechanical fragmentation enhances the contribution of Collembola to leaf litter decomposition. *European Journal Soil Biology*, v. 53, p. 23-31, 2012.

ZEE. Sumário Executivo do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão – ZEE: etapa Bioma Amazônico. CATUNDA, P.H.A.; DIAS, L.J.B.S., orgs. São Luís: IMESC, 2019.

ZHANG, M.; WU, Y.; QU, C.; HUANG, Q.; CAI, P. Microbial extracellular polymeric substances (EPS) in soil: From interfacial behaviour to ecological multifunctionality. *Geo-Bio Interfaces*, v. 1, e4, 2024. DOI: 10.1180/gbi.2024.4.

ZHAO, Q.; WANG, J.; HE, Q.; YIN, H. Carbon type and quantity regulate soil free-living nitrogen fixation through restructuring diazotrophic community. *Applied Soil Ecology*, v. 202, p. 105586, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105586>.



CAPÍTULO 5

TEMPO NA FORMAÇÃO DOS SOLOS DO MARANHÃO: EVOLUÇÃO GEOLÓGICA, ESTABILIDADE/REJUVENESCIMENTO E PEDOCRONOLOGIA

Eduardo Carvalho da Silva Neto¹

Professor – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo discute o tempo como fator de formação dos solos no Maranhão, articulando a longa duração geológica às dinâmicas recentes de uso da terra. Parte do arcabouço geológico, tectônico e sedimentar, com destaque para a Bacia do Parnaíba e seus eventos magmáticos, que define materiais de origem e períodos de exposição ou soterramento. Em seguida, analisam-se os registros cenozoicos de estabilidade (aplainamentos, coberturas lateríticas e Grupo Barreiras) e de rejuvenescimento (soerguimentos, dissecação, deposição e truncamentos), que estruturam cronologias relativas de perfis. A posição do estado na transição Amazônia-Cerrado-Caatinga modula o ritmo de intemperismo, drenagem e bioturbação, gerando assinaturas temporais expressas em classes de solos e feições diagnósticas (p.ex., Latossolos em superfícies estáveis, Plintossolos sob oscilação hídrica, Neossolos em sistemas costeiros e eólicos; crostas/ferricretes, plintita/petroplintita, gleização e caráter coeso em tabuleiros). Por fim, o tempo antrópico é abordado tanto pelos usos recentes (expansão agrícola e pressões costeiras) quanto por solos de origem antrópica (antropossolos em sambaquis), evidenciando acelerações e inflexões nos processos pedogenéticos. Em síntese, reconhecer o tempo como fator modulador da relação solo–paisagem, em múltiplas escalas, aprofunda a compreensão da diversidade pedológica do Maranhão e orienta, com maior propriedade, o planejamento e o manejo dos solos.

O tempo é um fator estruturante da pedogênese. Conecta processos de formação e transformação dos solos em escalas muito distintas, desde a história geológica até as dinâmicas recentes do uso da terra (Bockheim et al., 2005). Abrange a dimensão temporal dos processos de intemperismo, de formação e transformação dos materiais de origem, a sucessão de fases de estabilidade e rejuvenescimento da paisagem,

além das oscilações climáticas e das intervenções humanas (Dudal, 2005). Por isso, compreender o tempo como fator de formação implica entender os solos como resultado de longa duração, em que atributos morfológicos, mineralógicos e químicos traduzem trajetórias cumulativas e, muitas vezes, não lineares.

No Maranhão, a análise do tempo como fator de formação do solo pode iniciar-se pelo aspecto geológico: um território dominado por rochas sedimentares e sedimentos, com ocorrências ígneas e metamórficas em determinadas regiões, e compartimentado em três grandes domínios — Pré-Cambriano, Bacias Sedimentares Fanerozoicas e Coberturas Superficiais Cenozoicas (Almeida et al., 2000; Vasquez et al., 2012, Klein et al., 2008; 2009). Essa compartimentação não é apenas descritiva: ela define os materiais parentais e os cenários de exposição/soterramento sobre os quais a pedogênese opera ao longo de milhões de anos.

Em escalas geomorfológicas, a história da paisagem ao longo do tempo inclui fases de aplainamento e a instalação de coberturas lateríticas e depósitos do Grupo Barreiras, que registram períodos prolongados de estabilidade superficial e intensa alteração no Cenozoico (Dantas et al., 2020). Esses pacotes cenozoicos funcionam como marcadores de tempo: quando conservados em posição, favorecem a evolução de perfis espessos e altamente intemperizados; quando retrabalhados, rejuvenescem sequências pedológicas e reordenam o “tempo pedológico” do solo.

O tempo no contexto climático-ecológico acrescenta outra camada: o Maranhão situa-se numa faixa de transição entre Amazônia, Cerrado e Caatinga (Ab’Saber, 1960; Ross, 1985). Em escalas seculares a milenares, variações no balanço hídrico e na cobertura vegetal modulam fluxos de energia e matéria (água, bases, sílica, carbono), alterando a velocidade do intemperismo, a drenagem e a bioturbação e, com isso, os processos pedogenéticos. Esse mosaico transicional ajuda a explicar por que coexistem, em curtas distâncias, ambientes úmidos litorâneos, áreas sazonalmente secas do interior e superfícies eólicas costeiras holocênicas, cada qual imprimindo assinaturas temporais distintas aos solos (Lopes, 2020).

O resultado é uma cobertura pedológica cuja composição reflete maior ou menor influência do tempo. Em superfícies estáveis, predominam Latossolos — a classe de maior ocorrência no estado, cujo grau de evolução reflete longo tempo de intemperismo e ciclos climáticos e geomorfológicos. Em ambientes com restrição de drenagem atual ou pretérita, os Plintossolos registram oscilações hidrológicas e flutuações do nível de base em escala holocênica a pleistocênica. Em sistemas costeiros e eólicos recentes, Neossolos, frequentemente Quartzarênicos, refletem menor tempo pedológico e o papel dos pulsos sedimentares na renovação da superfície (Silva, 2020). Em conjunto, essas classes exemplificam como a idade relativa dos perfis emerge da interação entre clima, organismos, relevo e material de origem ao longo do tempo.

Diante desse contexto, este capítulo discute o tempo como fator de formação dos solos do Maranhão, articulando escalas geológicas e pedológicas com os processos que definem a idade relativa, o grau de intemperismo e a diversidade pedológica no estado, bases para compreender a distribuição, propriedades e usos dos solos maranhenses.

2. TEMPO GEOLÓGICO E A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA E MATERIAIS DE ORIGEM NO MARANHÃO

2.1. Domínios Tectônicos e Implicações para os Materiais Parentais

O Maranhão situa-se no norte da Plataforma Sul-Americana, inserido majoritariamente na Província Parnaíba e compartimentado em quatro domínios: (1) Fragmento Cratônico São Luís, (2) Cinturão Gurupi, (3) Bacias Sedimentares Fanerozoicas e (4) Coberturas Superficiais Cenozoicas. Os terrenos pré-cambrianos afloram apenas como pequenas “janelas” no Noroeste; mais de 98% do território é formado por bacias e coberturas sedimentares fanerozoicas (Klein e Souza, 2012). Essa compartimentação controla diretamente os materiais parentais que alimentam a pedogênese, desde rochas metamórficas/ígneas nos domínios pré-cambrianos até amplos pacotes sedimentares paleozoicos–mesozoicos e coberturas cenozoicas.

O Cinturão Gurupi constitui um orógeno neoproterozoico (NNW–SSE), com conjuntos metassedimentares e metavulcanossedimentares e várias gerações de rochas plutônicas (Almeida et al., 1976). Já o Fragmento Cratônico São Luís representa um fragmento de orógeno paleoproterozoico (Riaciano). Esses domínios, embora restritos em área, introduzem litologias mais antigas e variadas ao mosaico parental. As coberturas e bacias fanerozoicas, com destaque para a Bacia do Parnaíba — reúnem arenitos, folhelhos, carbonatos e evaporitos, enquanto as coberturas cenozoicas marcam fases de aplainamento, flutuações do nível do mar e intenso intemperismo, provendo espessas mantas areno-argilosas e pacotes lateríticos que funcionam como material de origem dos solos da região (Klein e Lopes, 2011).

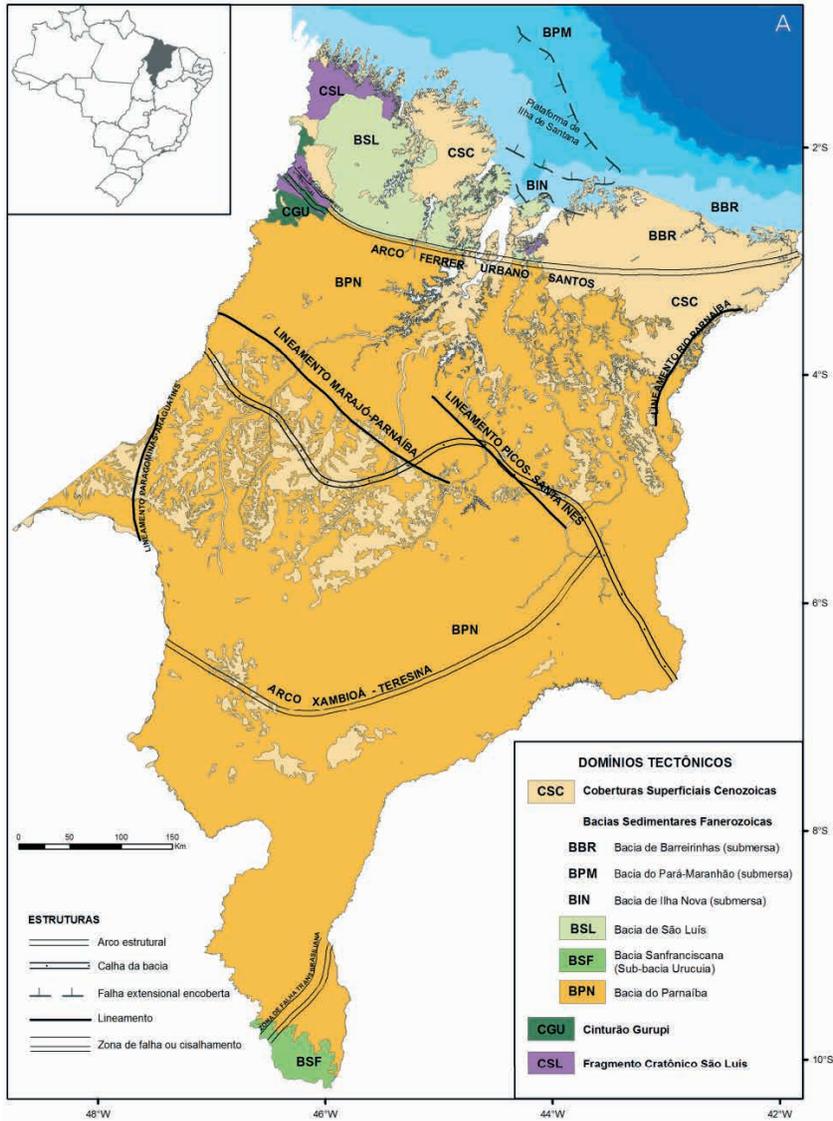


Figura 1. Mapa de domínios tectônicos no Estado do Maranhão. Fonte: CPRM (2012).

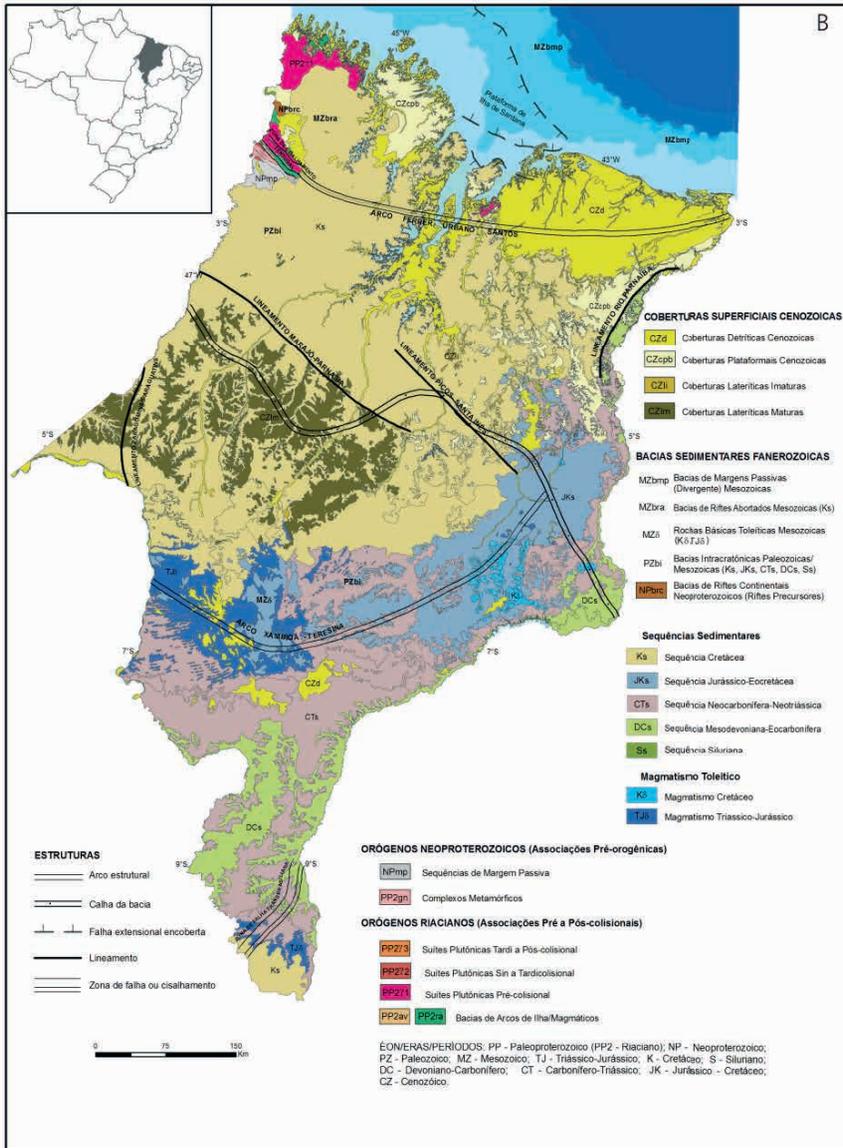


Figura 2. Mapa de associações tectônicas no Estado do Maranhão. Fonte: CPRM (2012).

Do ponto de vista pedológico, essa base litoestratigráfica explica a dominância de materiais parentais sedimentares (Itapecuru, Corda, Sambaíba, Barreiras e coberturas detríticas), dos quais derivam, por exemplo, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos extensos nos topos de platôs e chapadas (Dantas et al., 2020).

2.2. Sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba e eventos magmáticos como marcos temporais

A Bacia do Parnaíba registra cinco grandes sequências sedimentares: Siluriana (Grupo Serra Grande), Mesodevoniana–Eocarbonífera (Grupo Canindé), Neocarbonífera–Eotriássica (Grupo Balsas), Jurássica–Eocretácea (Pastos Bons/Corda) e Cretácea (Itapecuru, Grajaú, Corda/Codó), estabelecendo uma cronologia deposicional que alterna deposição, hiatos e discordâncias (Klein e Souza, 2012).

Intercalados a essas sequências, ocorreram um evento magmático toleítico no limite Triássico–Jurássico (Formação Mosquito; Diabásio Laranjal) e dois eventos cretáceos — um toleítico (Formação Sardinha) e um kimberlítico — que renovaram superfícies, introduziram rochas básicas e reorganizaram a paisagem. A distribuição espacial e a cronologia desses magmatismos são bem constrangidas: derrames basálticos Mosquito predominam a oeste; intrusões de diabásio cretáceas (Sardinha) são mais frequentes nas porções central, leste e nordeste; idades Ar–Ar datam o Mosquito em ~200–190 Ma, enquanto idades K–Ar situam a Sardinha em ~134–127 Ma, com possíveis pulsos intermediários. Tais eventos, além de fornecerem novos materiais parentais básicos, funcionam como “tempo-zero” do relógio superficial via intrusões/derrames, fraturamento, aporte térmico e posterior retrabalhamento sedimentar (Klein e Souza, 2012).

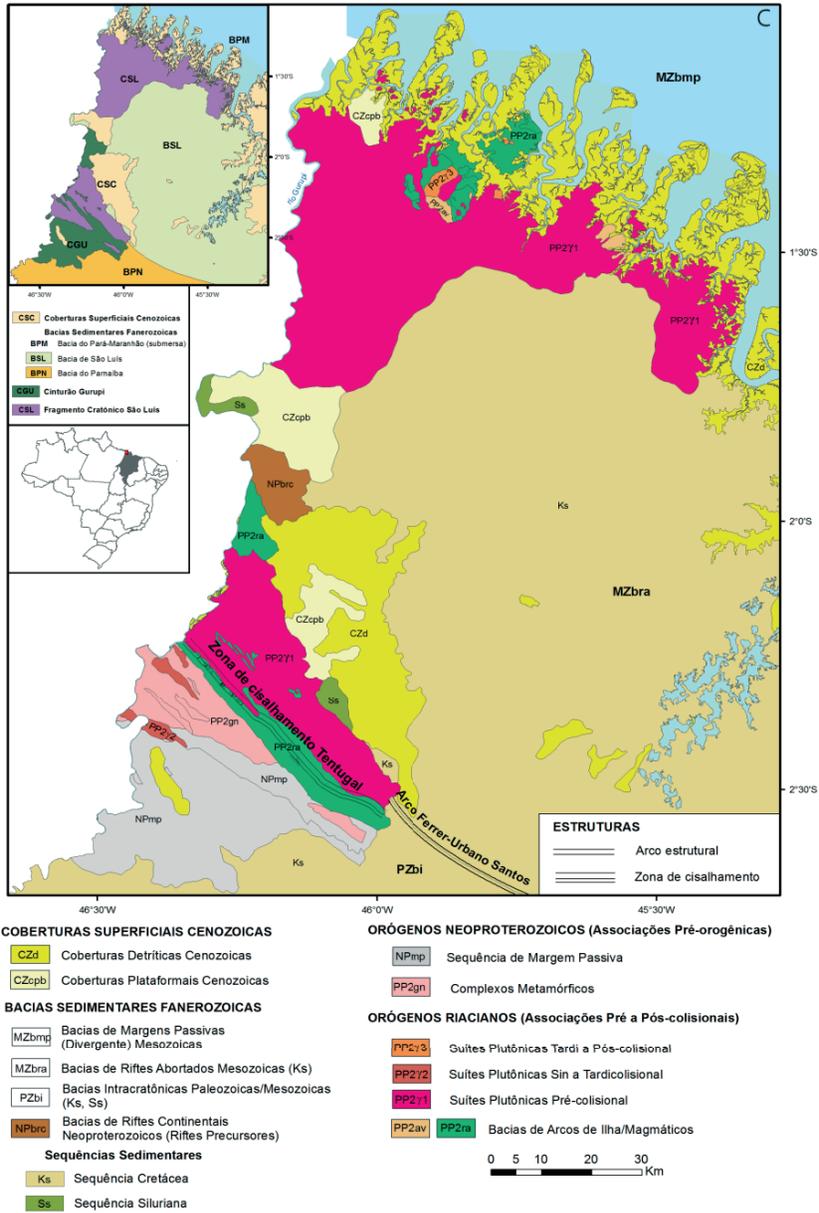


Figura 3. Mapa de detalhe das associações tectônicas do Fragmento Cratônico São Luís e do Cinturão Gurupi, no Estado do Maranhão. Fonte: CPRM (2012).

Em síntese, esses domínios tectônicos definem “de quando” vêm os materiais de origem, enquanto as sequências deposicionais e os pulsos magmáticos da Bacia do Parnaíba marcam “quando” e “como” esses materiais foram formados e rejuvenescidos. o pano de fundo temporal que condiciona a diversidade de materiais de origem e, por consequência, a variabilidade dos solos do Maranhão.

2.3. Tempo como determinante da relação solo-paisagem: estabilidade, rejuvenescimento e geoindicadores

Fases prolongadas de estabilidade morfodinâmica ao longo do Paleógeno favoreceram o desenvolvimento de mantos de alteração decamétricos e de perfis lateríticos bauxítico-ferruginosos nos topos tabulares e chapadas, frequentemente correlacionáveis à Superfície Sul-Americana (King, 1956). Esses perfis antigos, de grande expressão regional, são associados sobretudo aos períodos Eoceno e Oligoceno. No litoral e nas bordas da bacia, as coberturas plataformais e o Grupo Barreiras registram pulsos deposicionais entre o Mioceno e o Plioceno, sucedidos por depósitos pós-Barreiras quaternários (eólicos, flúvio-lagunares, manguezais e pântanos), compondo uma sequência que também funciona como marcador temporal da renovação de superfícies.

Em contraponto, eventos de rejuvenescimento derivam de soerguimentos diferenciais, dissecação, deposição e truncamentos, muitas vezes condicionados por reativações ao longo do Lineamento Transbrasiliano e pela instalação de altos estruturais/arcs, que compartimentam a Bacia do Parnaíba e deslocam eixos deposicionais. Esses processos impõem hiatos e discordâncias que “reiniciam” o tempo pedogenético em porções da paisagem. O registro geomorfológico dessa alternância é claro: chapadas e frentes de cuevas relacionadas a uma superfície paleógena foram, depois, desniveladas por soerguimento diferencial e novos aplainamentos, gerando superfícies relativamente mais jovens durante o Neógeno (Lopes, 2020).

A geodiversidade maranhense é amplificada por sua posição em uma das maiores faixas de transição fitoclimática do país (Meio-Norte/Matas de Cocais), situada entre as terras baixas equatoriais amazônicas, as depressões semiáridas da Caatinga e os chapadões tropicais do Cerrado. Esse cenário produz gradientes de pluviosidade e sazonalidade que modulam, em escalas seculares a milenares, o ritmo do intemperismo, a drenagem e a bioturbação, definindo percursos pedogenéticos distintos no litoral úmido, no interior sazonal e nos sistemas eólicos (Dantas et al., 2020).

Em planícies litorâneas e tabuleiros costeiros, a infiltração favorecida e o acúmulo de matéria orgânica tendem a sustentar perfis espessos; em vertentes convexas e setores mais dissecados, a maior mobilidade hídrica intensifica perdas por erosão;

já em vertentes côncavas e fundos de vale, a saturação periódica condiciona solos hidromórficos. Esses controles de posição na encosta e balanço hídrico imprimem assinaturas temporais contrastantes na espessura, organização de horizontes e grau de intemperismo.

Outro exemplo da relação do tempo como mediador da relação solo-paisagem pode ser observado superfície sublitorânea de Bacabal, ajustada ao nível de base do Golfão Maranhense. Essa condição exemplifica a persistência de superfícies aplainadas com cotas muito baixas (10-70 m), onde se alternam Argissolos nos tesos e Gleissolos nas zonas abaciadas e planícies fluviais — um arranjo que evidencia, na escala da paisagem, como o tempo geomorfológico e o regime hídrico se refletem na cobertura pedológica (Silva, 2020).

Em topos tabulares e chapadas, crostas ferruginosas e mantos lateríticos indicam tempos longos de exposição sob estabilidade relativa. No quadro regional, diferenciam-se coberturas lateríticas maduras (perfil completo com horizontes pálido/transicional, argiloso, bauxítico/fosfático e crosta ferruginosa) e imaturas (sem o horizonte bauxítico/fosfático), com evidências de maturação no Eoceno–Oligoceno e retrabalhamentos no Neógeno; no Maranhão, essas feições são recorrentes em porções centro-oeste e centro-leste (Lopes, 2020).

Em tabuleiros costeiros associados ao Grupo Barreiras, Latossolos e Argissolos podem apresentar caráter coeso nos horizontes superiores — uma assinatura diagnóstica associada à interação entre material parental e regime hídrico nessa faixa transicional. Em áreas com restrição de drenagem atual ou pretérita, a presença de plintita/ptroplintita e de Plintossolos reflete flutuações redox e variações do nível de base em escala quaternária, frequentemente em relevos planos a suavemente ondulados sobre litologias sedimentares (Itapecuru, Pedra de Fogo, Sambaíba, Barreiras). Nas planícies flúvio-marinhas (p. ex., Campo de Perizes), a hidromorfia associada ao regime hídrico e ao acúmulo de matéria orgânica favorece Gleissolos e outros solos hidromórficos — geoindicadores de condições úmidas recorrentes e de dinâmica deposicional ativa no Holoceno (Dantas et al., 2020; Silva, 2020).

Por fim, nos campos de dunas e sistemas eólicos da faixa costeira (e.g., Lençóis Maranhenses), a ocorrência de Neossolos Quartzarênicos expressa juventude pedológica e alta taxa de renovação superficial, compondo o contraponto temporal dos perfis espessos e muito intemperizados de topos estáveis.

3. TEMPO NA ESCALA DE TEMPO HUMANA: SOLOS ANTRÓPICOS E USOS DA TERRA

A influência das atividades humanas ao longo do tempo se sobrepõe às trajetórias naturais de formação dos solos no Maranhão, condicionando processos e redistribuindo fluxos de matéria e energia na paisagem. Do ponto de vista taxonômico e arqueopedológico, o “tempo antrópico” está materializado em solos de origem antrópica. No litoral norte, em Sambaquis de Panaquatira (São José de Ribamar), foi descrito um Antropossolo Conchífero Psamítico hipocarbonático êutrico (Bandeira et al., 2020), com horizontes escuros ricos em nutrientes e carbono, presença de conchas, restos faunísticos e fragmentos cerâmicos - um geoindicador direto de ocupações humanas pretéritas e de forte modificação pedogênica local.

Em termos mais amplos, na Amazônia brasileira, as Terras Pretas de Índio (TPI/ADE) são reconhecidas como solos antrópicos formados por aportes associados a assentamentos pré-colombianos, com enriquecimento em matéria orgânica e nutrientes (p.ex., P, Ca, Mg) (Kämpf e Kern, 2005; 2010; Macedo et al., 2017; 2019; Alho et al., 2019). Esses usos e legados evidenciam como a ação humana reordena horizontes temporais pedológicos: acelera a erosão onde a cobertura e o manejo são inadequados; altera regimes de drenagem e redox em áreas costeiras e fluviomarinhas; e cria horizontes antrópicos diagnósticos (Au) (Santos et al., 2025) em sítios arqueológicos costeiros. Tais transformações exigem manejo conservacionista compatível com cada classe de solo.

Em paralelo, nas últimas décadas, dois vetores de uso da terra se destacam. No interior, a expansão agrícola sobre Latossolos e Argissolos — que “sustentam a expansão do agronegócio, notadamente nas culturas de grãos” — intensificou-se a partir do polo de Balsas e, mais recentemente, alcançou a microrregião de Chapadinha, em áreas de cerrado (MapBiomias, 2025). Nos Nitossolos, apesar do “uso agrícola intensivo” possível, recomenda-se adotar práticas para “evitar o processo erosivo”. Já os Luvisolos, de “erodibilidade elevada”, são mais adequados a projetos de agricultura familiar e demandam restrições ao uso intensivo. Em Plintossolos — amplos no centro-norte e majoritariamente usados com pecuária, a drenagem restrita condiciona o calendário de uso e o tráfego.

Na zona costeira e estuarina, o “Golfão Maranhense” reúne ambientes extremamente dinâmicos e sensíveis. Ali, estudos destacam a vulnerabilidade dos manguezais “à expansão urbana desordenada de São Luís e das atividades do porto de Itaqui”. Ainda assim, a Baixada Maranhense abriga usos tradicionais — pesca e pecuária de subsistência (bovinos e bubalinos) — que, segundo avaliações regionais, “não promovem significativos impactos ambientais” nas vastas áreas planas e mal drenadas. Esses contrastes de uso se refletem em respostas pedológicas distintas: do pisoteio e compactação potenciais nas várzeas ao escoamento superficial e à

erosão acelerada em encostas cultivadas, especialmente onde solos apresentam limitações intrínsecas (por exemplo, caráter coeso em Argissolos Amarelos dos Tabuleiros (Dantas et al., 2014).

Em síntese, reconhecer o tempo antrópico na relação solo-paisagem — seja pelo pulso recente do agronegócio e da urbanização costeira, seja pelos testemunhos arqueopedológicos (sambaquis e antropossolos) — é crucial para interpretar assinaturas pedológicas, planejar o uso das terras e orientar intervenções que reduzam a aceleração indesejada de processos geomorfológicos e pedogenéticos no Maranhão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tempo estrutura a relação solo-paisagem no Maranhão desde a longa duração geológica até as dinâmicas recentes do uso da terra. A compartimentação tectônico-sedimentar, as sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba e os eventos magmáticos definem o pano de fundo litoestratigráfico e as oportunidades de exposição/soterramento que alimentam a pedogênese. Sobre esse embasamento, alternâncias cenozoicas entre estabilidade (aplainamentos, coberturas lateríticas, depósitos do Grupo Barreiras) e rejuvenescimento (soerguimentos, dissecação, deposição e truncamentos) estabeleceram cronologias relativas de perfis e um mosaico de materiais de origem que se refletem diretamente na diversidade pedológica do estado.

A posição do Maranhão em uma faixa de transição climática e ecológica entre Amazônia, Cerrado e Caatinga modulou o ritmo do intemperismo, a drenagem e a bioturbação, imprimindo assinaturas temporais aos solos. Em superfícies estáveis e bem drenadas, Latossolos registram evolução prolongada; onde há oscilação do lençol, Plintossolos expressam controles hidrológicos em escala quaternária; em sistemas costeiros e eólicos recentes, Neossolos evidenciam juventude pedológica. Feições como crostas/ferricretes, plintita/petroplintita e gleização funcionam como geoindicadores que auxiliam a leitura do tempo relativo nos perfis e na paisagem.

Sobrepondo-se a essas trajetórias, o tempo antrópico acelera processos, reorganiza fluxos e, em certos contextos, constrói solos — como revelam solos antrópicos em sítios arqueológicos costeiros. Reconhecer essa camada temporal é essencial para o mapeamento e o planejamento (inferência de idades relativas, delimitação de unidades coerentes, avaliação de riscos) e para o manejo (práticas conservacionistas ajustadas a limitações intrínsecas, como o caráter coeso em Argissolos dos Tabuleiros, restrição de drenagem em Plintossolos ou baixa reserva em Neossolos quartzarênicos). Integrar indicadores de estabilidade e rejuvenescimento, com a leitura sistemática de geoindicadores, articulados a dados de clima e uso da terra, é o caminho para diagnósticos mais completos, uso sustentável e conservação dos solos maranhenses.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Contribuição à geomorfologia do estado do Maranhão. *Notícia Geomorfológica*, v. 3, n. 5, p. 35–45, abr. 1960.
- ALHO, C. F. B. V.; SAMUEL-ROSA, A.; MARTINS, G. C.; HIEMSTRA, T.; KUYPER, T. W.; TEIXEIRA, W. G. Spatial variation of carbon and nutrients stocks in Amazonian Dark Earth. *Geoderma*, v. 337, p. 322–332, mar. 2019.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. The Upper Precambrian of South América. *Boletim do Instituto de Geociências da USP*, v. 7, p. 45–80, 1976.
- ALMEIDA, F. F. M.; NEVES, B. B. B.; CARNEIRO, C. D. R. The origin and evolution of the South American Plataform. *Earth Science Reviews*, v. 50, n. 1/2, p. 77–111, 2000.
- BANDEIRA, A. M.; IKEOKA, R. A.; APPOLONI, C. R.; TEIXEIRA, W. G. Caracterização de um perfil de solo e de cerâmicas arqueológicas do Sambaqui de Panaquatira, município de São José de Ribamar, MA. In: SILVA, M. B.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; GOMES, J. B. V.; SOUSA, D. M. G.; SOUSA, D. M. S. (orgs.). *Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão*. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2020. p. 176–200.
- BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma*, v. 124, n. 1–2, p. 23–36, 2005.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (orgs.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão*. Belém: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2012. 1 mapa. Escala 1:750.000.
- DANTAS, J. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1039–1050, 2014.
- DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I. C. N.; LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; TEIXEIRA, W. G. Análise integrada das paisagens do estado do Maranhão. In: SILVA, M. B.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; GOMES, J. B. V.; SOUSA, D. M. G.; SOUSA, D. M. S. (orgs.). *Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão*. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2020. p. 92–147.
- DUDAL, R. The sixth factor of soil formation. *Eurasian Soil Science: C/C of Pochvovedenie*, v. 38, suplemento, p. S60, 2005.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P. (org.). Tópicos em Ciência do Solo. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 277-320.

KÄMPF, N.; WOODS, W.; KERN, D. C.; CUNHA, T. J. Classificação das Terras Pretas de Índio e outros solos antrópicos antigos. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (eds.). As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2010. pt. 2, p. 87-102.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Brasileira de Geografia, v. 18, n. 2, p. 147-265, 1956.

KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Geologia e recursos minerais da Folha Centro Novo do Maranhão SA.23-Y-B-I, estados do Pará: escala 1:100.000. Belém: CPRM, 2011.

KLEIN, E. L.; SANTOS, R. D.; PINHO, S. C. C.; COSTA, J. B. S.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochemistry and geochronology of Paleoproterozoic granitoid magmatism: further evidence on the crustal evolution of the São Luís Craton, Brazil. Precambrian Research, v. 165, n. 3/4, p. 221-242, 2008.

KLEIN, E. L.; SANTOS, R. D.; PINHO, S. C. C.; COSTA, J. B. S.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronology, Nd isotopes and reconnaissance geochemistry of volcanic and metavolcanic rocks of the São Luís Craton, northern Brazil: implications for tectonic setting and crustal evolution. Journal of South American Earth Sciences, v. 27, p. 129-145, 2009.

KOTSCHUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W.; CALAF, J. M. C. Evolução geológica da porção meridional da Província Bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará e Oeste do Maranhão). Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 2, p. 263-272, 2005.

LOPES, E. C. S. Geologia do estado do Maranhão. In: SILVA, M. B.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; GOMES, J. B. V.; SOUSA, D. M. G.; SOUSA, D. M. S. (orgs.). Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2020. p. 57-92.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; CORRÊA, M. M.; MARTINS, G. C.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenetic processes in Anthrosols with pretic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. PLoS ONE, v. 12, n. 5, e0177127, maio 2017.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; SOUZA, A. C. G. de; SILVA, F. W. R.; ENCINAS, O. C.; NEVES, E. G. Amazonian dark earths in the fertile floodplains of the Amazon River, Brazil: an example of non-intentional formation of anthropic soils in the Central Amazon region. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 14, n. 1, p. 207-227, jan./abr. 2019.

OLIVEIRA, F. S.; FURQUIM, S. A. C.; PEREIRA, M. G.; SOUZA, C. D.; NETO, E. C. S.; CALEGARI, M. R.; COSTA, A. M. A pedologia e seus diálogos científicos: abordagens analíticas transversais para o estudo dos solos. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG: SBCS, 2021. v. 11, p. 1–54.

ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 4, p. 25–39, 1985.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SILVA, M. B. A XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão. In: SILVA, M. B.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; GOMES, J. B. V.; SOUSA, D. M. G.; SOUSA, D. M. S. (orgs.). *Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos – RCC do Maranhão*. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2020. p. 29–56.

TEIXEIRA, S. G.; SOUZA FILHO, P. W. M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, supl. 1, p. 69–82, 2009.

VASQUEZ, M. L.; KLEIN, E. L.; LOPES, E. C. S. Compartimentação tectônica. In: KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (orgs.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão*. Belém: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2012. p. 21-38. Escala 1:750.000.



C A P Í T U L O 6

PROCESSOS PEDOGENÉTICOS MÚLTIPLOS

Marlen Barros e Silva

Professora – Universidade Estadual do Maranhão

Marcos Gervasio Pereira

Professor – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Professora – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Glécio Machado Siqueira

Professor – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

A pedogênese, ou gênese do solo, é um processo contínuo e dinâmico que resulta da interação entre cinco fatores, denominados de fatores de formação, a saber: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo (Jenny, 1941), bem como da atuação pedogenéticos específicos, anteriormente denominados de mecanismos de formação, responsáveis tanto pela transformação do material original em solo quanto pela evolução do perfil (Simonson, 1959; Fanning; Fanning 1989; Kämp; Curi, 2012; Pereira et al., 2023) (Figura 1.). Esses processos atuam de forma simultânea e/ou sequencial, podendo se sobrepor e interagir em múltiplas escalas espaciais e temporais, resultando nos atributos que caracterizam os diferentes tipos de solo, os quais refletem o equilíbrio entre processos presentes e passados (Resende et al., 2014). Isso confere aos solos uma natureza policíclica e complexa, com horizontes e propriedades resultantes de diversas fases de formação (Santos et al., 2025).

Quatro são os processos pedogenéticos múltiplos definidos por Simonson (1959): adições, perdas, transformações e translocações. Segundo Simonson, todos os processos ocorrem de forma simultânea nos solos, mas o predomínio de um ou mais sobre os outros determina as características do solo e, associado aos fatores de formação, resulta nos chamados processos pedogenéticos específicos (Schaeztl; Anderson, 2005). Os processos pedogenéticos múltiplos são detalhados no texto a seguir.

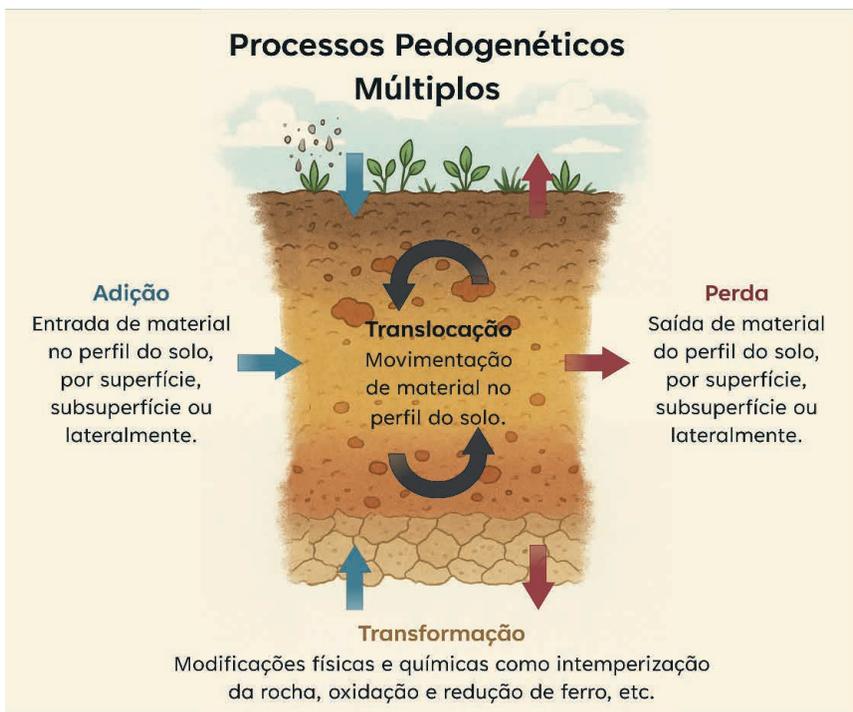


Figura 1. Representação esquemática dos processos pedogenéticos:

2. ADIÇÕES

Entende-se por adições todas as entradas de matéria e/ou energia provenientes do meio externo ao perfil do solo, tanto de forma natural quanto por ação antrópica. As adições podem ocorrer na superfície, na subsuperfície ou lateralmente, sendo as primeiras as ocorrências mais comuns.

Como exemplos de adições naturais em superfície, podem ser citados: os ganhos de calor por absorção de energia solar; resíduos orgânicos de origem vegetal (serapilheira e resíduos vegetais de culturas) e/ou animal (Figura 2) – sendo este o principal processo na formação de horizontes de constituição orgânica hísticos (H ou O); água e solutos trazidos pelas chuvas; sedimentos aluviais (depositados por rios em planícies de inundação) – importantes na formação de Neossolos Flúvicos, colúviais (transporte de materiais de elevações circunvizinhas e deposição em partes mais baixas da encosta), ou colúvio-aluviais; além de gases como CO_2 , N_2 .

Dentre as adições superficiais de origem antrópica, podem-se citar: corretivos; adubações; remineralizadores (pós de rochas); irrigação e/ou fertirrigação. Em áreas com uso intenso de agrotóxicos ou de deposição de rejeitos (urbanos, industriais ou de mineração) pode haver a introdução de substâncias tóxicas e, desta forma, a contaminação do solo.

Em subsuperfície, destaca-se a adição de íons pelo lençol freático, por meio de ascensão capilar, comum em algumas planícies e depressões localizadas em ambientes de clima árido ou semiárido, onde a precipitação pluviométrica supera à evapotranspiração.

Menos comum é a adição lateral de minerais da fração argila, que pode ocorrer em encostas de paisagens com relevo suave ondulado ou ondulado. Nessas áreas, a declividade da superfície favorece a infiltração da água no solo e seu posterior fluxo lateral — especialmente quando o perfil apresenta diferenças de permeabilidade entre os horizontes — contribuindo para o transporte da argila dispersa e sua adição aos solos localizados à jusante, isto é, em porções inferiores da paisagem.

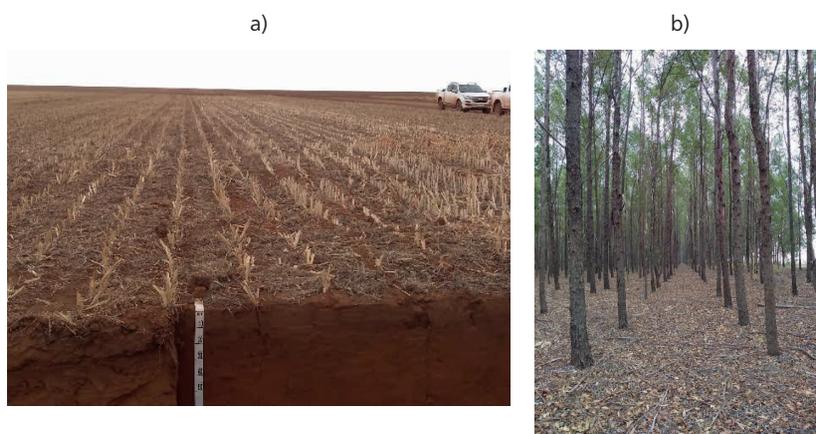


Figura 2. Adição de resíduos culturais (a) e serapilheira (b) na superfície do solo. Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal).

3. PERDAS

As perdas referem-se à saída de matéria e/ou energia do perfil do solo para o meio externo e desempenham um papel central na evolução química, física, mineralógica e morfológica dos solos. As perdas, que podem ser naturais ou resultantes da ação antrópica, assim como as adições, podem ocorrer na subsuperfície, na superfície ou lateralmente, e estão intimamente ligadas aos fatores formadores do solo, especialmente o clima, o relevo e os organismos.

Do ponto de vista químico, a principal forma de perda subsuperficial ocorre por meio da lixiviação de íons solúveis, como cálcio, magnésio, potássio e nitrato, para o lençol freático, pela percolação da água em regiões de alta pluviosidade e em solos de drenagem livre. Esse processo é particularmente acentuado na formação de solos tropicais altamente intemperizados como os Latossolos e Argissolos, em que há acentuada remoção de bases trocáveis e sílica, favorecendo o empobrecimento nutricional e o acúmulo relativo de óxidos de ferro e alumínio (Buol et al., 2011; Resende et al., 2014; Pereira et al., 2023).

Além das perdas subsuperficiais por lixiviação, ocorrem também perdas superficiais, como as de água por evaporação, acentuadas no processo de salinização em regiões áridas e semiáridas. Vale destacar as perdas por erosão hídrica e/ou eólica, que envolvem a retirada de partículas sólidas da superfície do solo, como argilas e matéria orgânica e os nutrientes adsorvidos, especialmente em áreas agrícolas (lavouras, pastagens ou silvicultura) com manejo inadequado, com intensa mobilização do solo e pouca cobertura vegetal, ou em relevo acentuado (Figura 3). As perdas por erosão se expressam pela diminuição da espessura ou mesmo a completa remoção do horizonte superficial do solo, redução da sua fertilidade e favorecem os processos de degradação (Schaetzl; Anderson, 2005).

Ocorrem ainda perdas gasosas em superfície, como a de nitrogênio, por meio dos processos de volatilização e desnitrificação, e a de carbono, resultantes da respiração microbiana e da decomposição da matéria orgânica, que liberam CO₂ ou CH₄ para a atmosfera e influenciam o ciclo do carbono no solo e sua dinâmica em ambientes agrícolas e naturais (Vidal-Torrado et al., 2005). Essas perdas são ainda mais relevantes quando se considera a relação entre as mudanças de uso do solo, de vegetação nativa para agricultura, e o aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEE).



Figura 3. Perdas de solo por processos erosivos em encostas.
Foto: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal).

Adicionalmente podem ocorrer perdas laterais de argila, favorecendo o aumento absoluto desta fração em um outro perfil de solo, como citado antes para as adições laterais.

Em síntese, o mecanismo das perdas é essencial para compreender a dinâmica de formação e evolução dos solos, pois interfere na sua composição química (fertilidade), física, mineralógica e na morfologia. Sua intensidade e natureza variam de acordo com as condições ambientais e o uso da terra.

4. TRANSLOCAÇÕES

As translocações podem ser definidas como os movimentos de materiais dentro do próprio perfil do solo, geralmente de um horizonte para outro, podendo ocorrer tanto na forma de partículas sólidas (argilas ou moléculas orgânicas) quanto de substâncias dissolvidas em solução (íons) ou transportadas em suspensão coloidal, sem que haja a remoção dos constituintes do solo para o meio externo.

O processo múltiplo de translocação é responsável pela redistribuição vertical de constituintes do solo, resultando em horizontes com características distintas ao longo do perfil e que podem ser diagnósticas de algumas classes de solo. Esse movimento pode ser descendente, ascendente ou mesmo lateral, embora o deslocamento vertical descendente seja o mais comum (Buol et al., 2011). Entre os materiais mais comumente translocados encontram-se argilas, óxidos de ferro e/ou alumínio e matéria orgânica dissolvida, sais solúveis e carbonatos. Além disso, as raízes e a biota do solo também contribuem para a redistribuição de materiais no solo (Schaeztl; Anderson, 2005).

Um dos exemplos mais clássicos da ação do processo múltiplo de translocação na pedogênese é o da fração argila. Chamado de eluviação/iluviação ou argiluviação, resulta do deslocamento vertical da fração argila em suspensão pela água de percolação do horizonte superficial para o subsuperficial, podendo levar à formação de um gradiente textural entre o horizonte A e o horizonte Bt (iluvial), ou ainda à formação de um horizonte E (eluvial) sobrejacente ao horizonte de iluviação de argila (Bt), como observado em Argissolos, Luvisolos e Planossolos (Resende et al., 2014). Quando a iluviação das argilas resulta no expressivo revestimento de partes externas dos agregados com aspecto lustroso e brilho graxo, reconhece-se o atributo da cerosidade, necessário à identificação do horizonte B nítico, diagnóstico para a ordem dos Nitossolos (Santos et al., 2025).

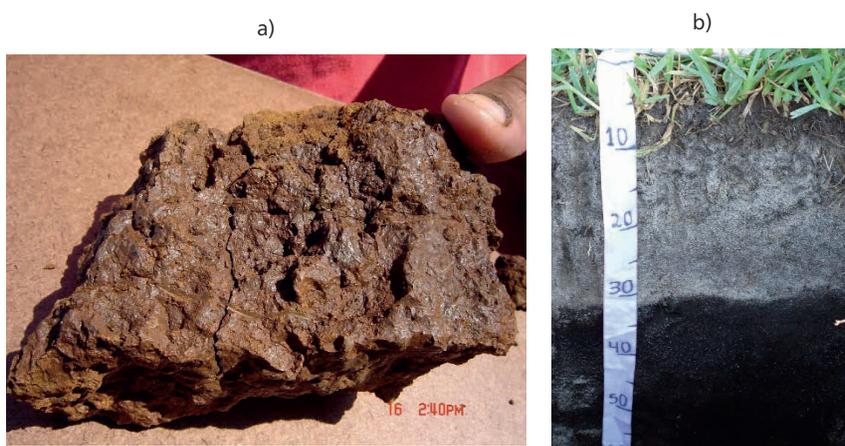


Figura 4. (a) Cerosidade propriedade morfológica resultante da deposição de argila na superfície de um torrão de solo e (b) Translocação de compostos orgânicos resultando no acúmulo de material orgânico em subsuperfície levando à formação de horizonte B espódico, observa-se o contraste entre os horizontes eluvial e iluvial. Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal).

Outro exemplo de translocação é a de complexos organo-oxídicos dispersíveis, em que Al é dominante e o Fe codominante (Anjos et al., 2025), em solos de textura essencialmente arenosa levando à formação do horizonte B espódico, diagnóstico da ordem dos Espodosolos (Santos et al., 2025) (Figura 4).

Em perfis de solos influenciados por variações no regime de umidade, principalmente em ambientes com flutuações do nível do lençol freático, a redução do ferro favorece a translocação desse íon no perfil de solo. Quando o lençol freático ascende durante o período chuvoso, o ferro é solubilizado e transportado em solução; já nos períodos de menor precipitação pluviométrica, em função do rebaixamento do lençol e surgimento de condições oxidantes, o ferro precipita, concentrando-se em determinadas partes do solo, levando à formação de feições morfológicas denominadas de mosqueados. Esse ciclo de redução-oxidação (redox) também é fundamental para o desenvolvimento da plintita (Resende et al., 2014), que é critério diagnóstico para a ordem dos Plintossolos e de outros solos com caráter plintico (Santos et al., 2025).

Em climas mais secos, áridos ou semiáridos, pode haver a translocação de íons dos horizontes subsuperficiais para os superficiais, por capilaridade (soluviação), formando, em alguns casos, crostas salinas recobrimdo o perfil de solo, como exemplos, Planossolos Nátricos e Gleissolos Sálícos.

5. TRANSFORMAÇÕES

As transformações referem-se às modificações químicas, físicas e mineralógicas que ocorrem no solo ao longo do tempo, resultando na formação de novos materiais ou na alteração daqueles já existentes. Podem ser de ordem química ou física, sob a influência do componente biológico e atuam diretamente na diferenciação dos horizontes, na gênese de novos minerais e compostos orgânicos, e na mudança nas características estruturais e coloidais do solo, resultando na conversão do material de origem em um sistema complexo e dinâmico.

Quanto ao material orgânico (MO), o processo de transformação envolve a decomposição da serapilheira ou resíduos de culturas, seguida da humificação, isto é, da formação de ácidos húmicos, fúlvicos e humina, que constituem a matéria orgânica estável do solo. Esses compostos afetam diretamente a retenção de água e a capacidade de troca de cátions, sendo responsáveis pela cor mais escura dos horizontes superficiais (Resende et al., 2014), além de influenciarem a biodiversidade e a atividade biológica no solo. Adicionalmente, a decomposição da MO orgânica leva à produção dos ácidos orgânicos, que atuam, entre outras interações, na união das partículas e formação de agregados, favorecendo o aumento da porosidade do solo.

Em áreas cultivadas, as práticas de calagem e adubação contribuem, na camada arável do solo, para mudanças na composição do complexo sortivo do solo, diminuindo os teores de elementos tóxicos como o alumínio e aumentando os de bases (Ca, Mg e K) e de nitrogênio e fósforo, bem como alterações na reação do solo (pH e acidez).

Nos solos minerais formados *in situ* e a partir de rochas ígneas, o processo múltiplo de transformação é relevante desde o início, na intemperização dos minerais primários como feldspatos, olivinas e micas, que, ao interagirem com a água, o oxigênio e ácidos orgânicos, transformam-se em minerais secundários, levando a formação de argilominerais (como caulinita e montmorilonita) e óxidos (como hematita, goethita e gibbsita). Esses processos ocorrem via reações de hidrólise, oxidação-redução, hidratação e carbonatação (Buol et al., 2011). As transformações têm início antes da própria pedogênese, com a alteração das rochas tão logo são expostas aos agentes do intemperismo (água, atmosfera e organismos), e podem ocorrer de forma mais rápida ou mais lenta em função da natureza do material de origem, além das condições climáticas e topográficas.

Em condições propícias de clima, altitude e/ou em ambientes hidromórficos, a transformação da MO pode ocorrer de forma apenas parcial, o que favorece a sua acumulação no solo, originando os horizontes hísticos (O ou H) (Silva Neto et al., 2023; Soares et al. 2021, Pereira et al., 2023) que são diagnósticos da ordem dos Organossolos.

No perfil do solo, podem ser observadas cores mosqueadas ou variegadas presentes em horizontes subsuperficiais de Plintossolos e Gleissolos (Santos et al., 2015) (Figura 5) e outros solos formados em ambientes com hidromorfismo são exemplos da transformação de formas do ferro, também do manganês, em função dos processos de redução e oxidação. Em solos que apresentam horizontes sulfúricos após terem sido submetidos à drenagem pode ser observada a presença de jarosita (Figuraxxb) identificada por um mosqueamento de cor amarelada.

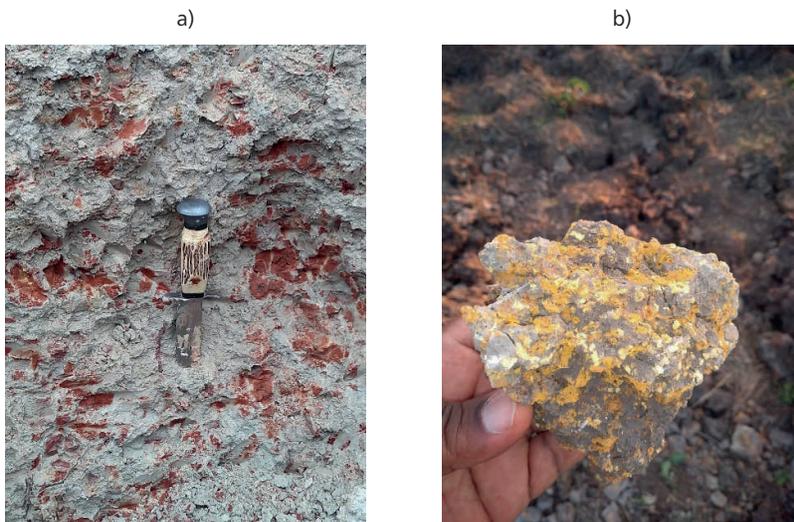


Figura 5. (a) Cores mosqueadas decorrentes da redução e oxidação do ferro, levando a presença de plintita; (b) Mosqueamento devido a presença de jarosita.. Fotos: Marcos Gervasio Pereira (Acervo Pessoal).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pedogênese é um processo dinâmico e o solo um sistema aberto, portanto, mais de um processo pedogenético múltiplo pode ser observado nos perfis de solo e estes podem variar com o tempo e em função dos fatores de formação. Quando um processo ocorre de forma mais intensa, contribuindo de maneira expressiva para a diferenciação dos horizontes, este será relevante na identificação das classes de solo, como exemplo, a translocação de argila para os horizontes subsuperficiais que leva à formação do horizonte diagnóstico B textural, que caracteriza, entre outras classes, os Argissolos, ou ainda, as perdas de bases e sílica e a transformação de minerais primários em secundários (caulinita e óxidos) que definem o horizonte B latossólico, o qual caracteriza os Latossolos. Estas duas sendo as ordens de solos predominantes no território brasileiro.

Alguns processos múltiplos ocorrem na própria alteração do material de origem ou quando da sua deposição, como o intemperismo das rochas e a adição de sedimentos fluviais e coluviais. O fator organismos do solo influencia em todos os processos múltiplos, seja diretamente, como fonte, na adição de nutrientes e componentes orgânicos, ou na perda de nutrientes para a atmosfera em processos como a desnitrificação, na transformação dos resíduos vegetais e no processo de redução do ferro e ainda favorecendo a translocação através de poros criados pelos organismos do solo e as raízes das plantas.

As atividades antrópicas podem levar a mudanças nos fatores de formação do solo, como no relevo pela sistematização do terreno e alteração de declividade, nos organismos pela mudança de cobertura vegetal, nas condições hidrológicas pela drenagem e/ou irrigação, ou ainda pelas práticas agrícolas, alterando a intensidade dos processos múltiplos, em especial, para os horizontes superficiais do solo. As atividades urbanas, industriais e de mineração, entre outras, também são importantes agentes nos processos de formação dos solos e devem ser consideradas como fatores relevantes e sua expressão justifica até mesmo a criação de novas classes de solos, a exemplo de sistemas de classificação internacionais.

REFERÊNCIAS

ANJOS, L.H.C.; KER, J.C.; SHIMIZU, S.H.; PEREIRA, M.G.; ARAÚJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, V. A. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 8ª Edição - Revisada e ampliada. Viçosa, MG: SBCS, 2025. 158 p.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P. A. Soil genesis and classification. 6. ed. Ames: Wiley-Blackwell, 2011.

FANNING, D. S.; FANNING, M. C. B. Soil morphology, genesis, classification. New York, John Wiley & Sons, 1989. 395p.

JENNY, H. J. Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York, 1941. 281 p.

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

PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; SILVA NETO, E.C.; PINHEIRO JUNIOR, C.R. Solos do Rio de Janeiro: Gênese, Classificação e Limitações ao Uso Agrícola. Editora Atena, 2023. 231p. Doi: 0.22533/at.ed.273232510

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

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; ARAUJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2025. 393 p.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. Soils: genesis and geomorphology. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

SIMONSON, R. W. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23:152-156, 1959.

SOARES, P.F.C.; SILVA, R.C.S.; SILVA NETO, E.C.; PEREIRA, M.G.; PINHEIRO JUNIOR, C.R.; PESSEDA, L.C.R.; ANJOS, L.H.C. Histosol pedogenesis in floodplain coastal environments in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Catena*, 207, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105612>

SILVA NETO, E.C.; COELHO-JUNIOR, M.G.; HÓRAK-TERRA, I.; GONÇALVES, T.S.; ANJOS, L.H.C.; PEREIRA, M.G. Organic Soils: Formation, Classification and Environmental Changes Records in the Highlands of Southeastern Brazil. *Sustainability* 2023, 15(4), 3416; <https://doi.org/10.3390/su15043416>

VIDAL-TORRADO, P. et al. Gênese, morfologia e classificação dos solos. Piracicaba: ESALQ/USP, 2005.



C A P Í T U L O 7

CLASSES DE SOLOS DO ESTADO DO MARANHÃO

Marcos Gervasio Pereira

Professor - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Professora - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Marlen Barros e Silva

Professora - Universidade Estadual do Maranhão

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Pesquisador – EMBRAPA SOLOS

Glécio Machado Siqueira

Professor - Universidade Federal do Maranhão

1. INTRODUÇÃO

Situado em uma região de transição entre o trópico úmido e o semiárido, o estado do Maranhão, com seus 331.937,45 km² de área e a segunda maior costa litorânea do Brasil, apresenta cobertura pedológica diversificada (Figura 1). Essa diversidade pedológica reflete diretamente os contrastes geomorfológicos e geoambientais do território maranhense, que se estende da planície costeira atlântica até os altos platôs do sul do estado, passando por áreas de planaltos dissecados, tabuleiros e depressões interplanálticas (Dantas et al., 2013; Batistella et al., 2014).

A compartimentação geomorfológica do Maranhão, caracterizada, predominantemente, por feições do domínio sedimentar e cristalino, exerce influência direta sobre a distribuição dos solos, bem como sobre seus atributos físicos, químicos e morfológicos (Klein; Sousa, 2012; Lopes; Teixeira, 2013). Associam-se a essas características os distintos regimes climáticos identificados segundo a classificação de Köppen, os quais variam entre os tipos equatorial úmido (Af), tropical úmido (Am) e tropical com estação seca (Aw), condicionando processos pedogenéticos diferenciados ao longo do território (Köppen, 1936; Batistella et al., 2014).

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais classes de solos em nível de Ordem e Subordem, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos et al., 2025) identificadas no território maranhense, destacando suas características, os processos pedogenéticos envolvidos na sua formação, a sua distribuição e relações com os diferentes ambientes naturais. Para isso, serão considerados dados de levantamentos pedológicos pregressos, análises de paisagens, aspectos geológicos e climáticos, em uma abordagem integrada que visa compreender a complexidade do meio físico do estado.

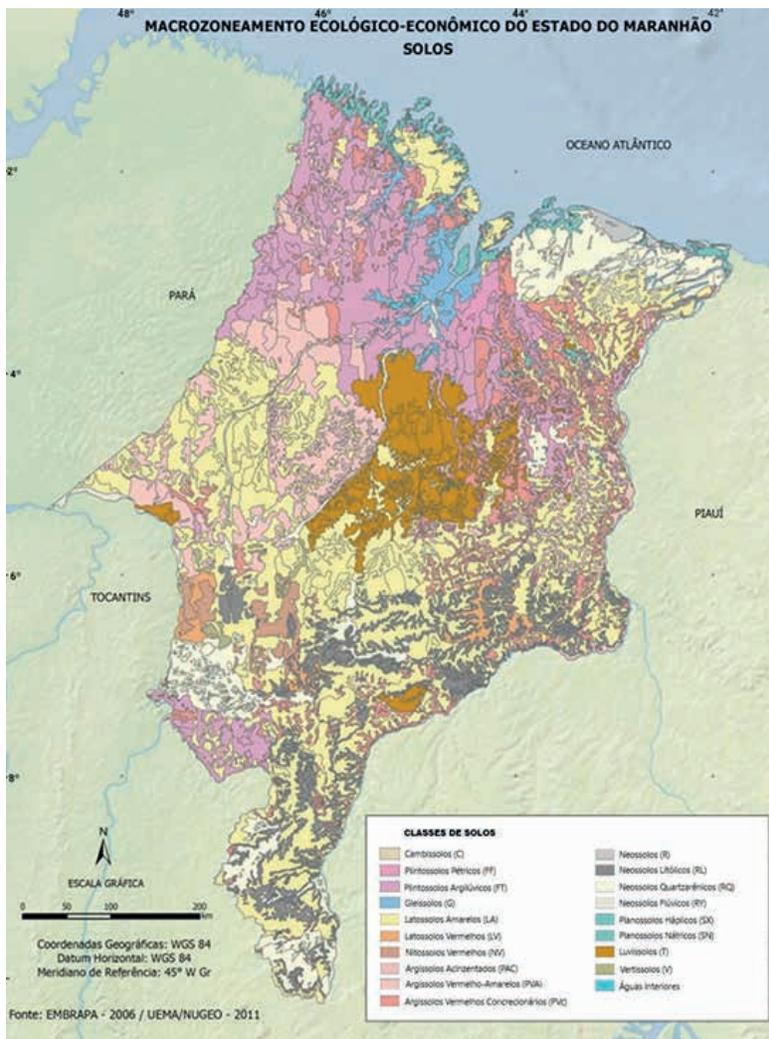


Figura 1. Mapa pedológico do estado do Maranhão. Fonte: Batistella et al. (2014).

Os primeiros estudos e mapeamento de solos do estado do Maranhão foram realizados por Jacomine *et al.*, (1980 e 1986). Esses estudos forneceram a primeira visão abrangente sobre a distribuição de classes de solos no estado. Sua metodologia de campo rigorosa, combinada com as tecnologias cartográficas mais avançadas de sua época, gerou uma base de dados que foi posteriormente digitalizada e incluída na Base de Dados de Solos da Embrapa (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/1753>). Essa digitalização permitiu que os dados fossem integrados a diferentes Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para diferentes usos, bem como para o Mapeamento Digital de Solos (Mendonça-Santos *et al.*, 2020; Horst *et al.*, 2025 - Capítulo 8 deste livro) e, de forma decisiva, para o Zoneamento Ecológico-Econômico do estado do Maranhão - ZEE-MA (MARANHÃO, 2020). Nesses estudos, ficou evidenciada a predominância de Latossolos e Argissolos, que, segundo estudos contemporâneos, são os solos mais expressivos e explorados economicamente no Maranhão. O documento original, disponível em acesso aberto, continua a orientar outros trabalhos e políticas de uso da terra, a expansão da fronteira agrícola e o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável.

A seguir, descreve-se cada uma das classes de solos que ocorrem no estado do Maranhão, evidenciando suas características, distribuição espacial, potencialidades e uso atual.

2. ARGISSOLOS

Caracterizados pela presença de horizonte subsuperficial subjacente a um horizonte A ou E, com acúmulo significativo de argila em quantidade suficiente para a identificação do horizonte diagnóstico B textural (Bt) (sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C), os Argissolos apresentam argila de baixa atividade (capacidade de troca catiônica – CTC menor ou igual a $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ argila), admitindo-se ainda argila de alta atividade, desde que esta seja conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B (Santos *et al.*, 2025). Caso apresentem também horizontes plínticos, concrecionários, litoplínticos ou glei, estes não podem estar sobrejacentes e nem coincidentes com o horizonte Bt (Santos *et al.*, 2025).

Na formação do gradiente textural (incremento de argila) exigido para o reconhecimento dos Argissolos, destaca-se os processos pedogenéticos específicos de lessivagem ou argiluviação, que envolve eluviação (saída) e iluviação (acúmulo) das argilas (Quénard *et al.*, 2011; Kämp; Curi, 2012; Pereira *et al.*, 2023). Favorecido em condições de declive suave e boa drenagem, o processo da argiluviação (eluviação/iluviação) consiste na translocação mecânica (física) de partículas finas de argila que se encontram dispersas no horizonte superficial ou intermediário, para a subsuperfície,

levadas em suspensão pela solução do solo através dos poros, resultando em aumento absoluto no teor de argila em profundidade. Adicionalmente, em áreas de declive acentuado, pode ocorrer o processo pedogenético específico da elutriação, isto é, a remoção (perda) seletiva das partículas de argila dos horizontes superficiais por erosão, resultando no aumento relativo do teor de argila em subsuperfície (Kämpf; Curi, 2012). Processos secundários, como ferrólise e neoformação de argilas também podem contribuir para a formação de gradiente textural (Phillips, 2004, 2007).

Os Argissolos, amplamente distribuídos em diferentes formas de relevo – desde superfícies suave-onduladas até montanhosas, constituem uma das classes de solos mais heterogêneas (Lepsch, 2011). Essa variabilidade expressa-se em atributos como profundidade, que pode variar de rasa a muito profunda, saturação por bases, que pode ser alta ou baixa, e no tipo de transição entre horizontes, a qual pode ocorrer de forma gradual ou abrupta.

No Maranhão, os Argissolos correspondem à segunda classe de solos mais extensa, cobrindo aproximadamente 18% do território estadual (Jacomine et al., 1986) (Figura 2).

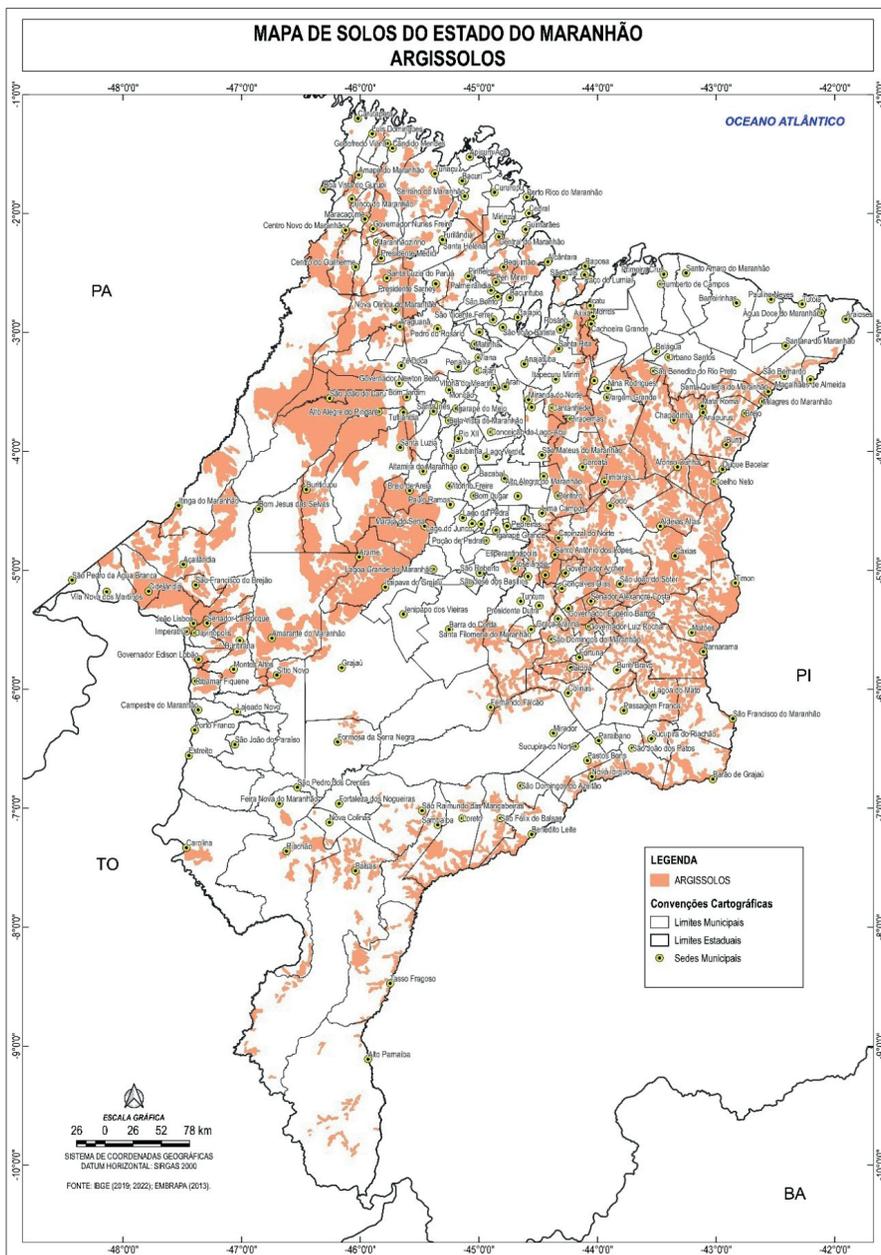


Figura 2 – Distribuição espacial dos Argissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

Estão distribuídos por todo o estado, com predominância da subordem Argissolos Vermelho-Amarelos (Figura 3a), mais comuns na porção centro-norte, onde se associam a Plintossolos Argilúvicos e Pétricos, em relevos que variam de planos a ondulados, recobertos pela “Mata dos Cocais”, vegetação símbolo do estado, onde são explorados principalmente com pecuária bovina. Nessas áreas, desenvolvidos a partir de litologias da Formação Itapecuru, os Argissolos Vermelho-Amarelos são, em sua maioria Distróficos, bem a moderadamente drenados e de baixa fertilidade química natural – condição também observada para os Argissolos Vermelho-Amarelos localizados nos topos de chapadões no sul e sudoeste maranhense, onde se encontram associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos e Amarelos nas áreas de cerrado. No centro do estado, Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos desenvolvem-se a partir de rochas carbonáticas, fosfáticas ou pelíticas da Formação Itapecuru (Dantas et al., 2013), ocorrendo associados a Luvisolos Crômicos e Luvisolos Hápicos. Em menor proporção, registram-se Argissolos Amarelos (Figura 3b) associados a Latossolos Amarelos nos baixos platôs do leste maranhense, região considerada a nova fronteira agrícola do estado, onde vem se expandindo os cultivos de soja e eucalipto. Derivados de sedimentos do Grupo Barreiras, esses Argissolos Amarelos podem apresentar, por vezes, caráter coeso (Lopes et al., 2024).

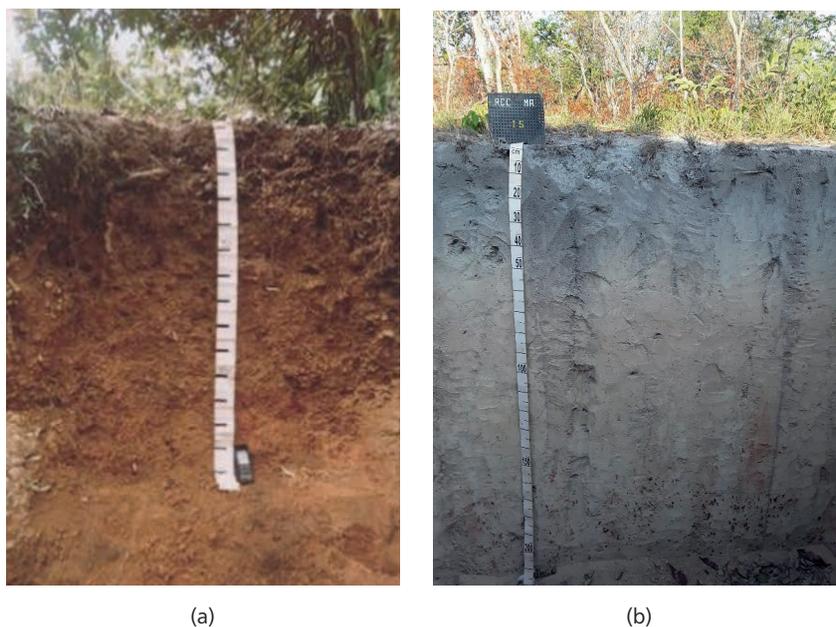


Figura 3 – Perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo, em Axixá (a) e Argissolo Amarelo, em Anapurus (b), Maranhão. Fotos: Raimundo Carvalho Filho (in memoriam) (a) e Marlen Barros e Silva (b).

Como principais potencialidades destes solos, destaca-se, nos perfis de classes de texturas média ou mais argilosa, a boa agregação e a elevada capacidade de armazenamento de água, favorecendo o seu uso agrícola, desde que bem manejados com práticas conservacionistas.

Quanto à aptidão agrícola, os Argissolos apresentam potencial variável, tendo como limitações a suscetibilidade à erosão hídrica, devido, principalmente, à presença de gradiente textural, que condiciona diferenças no fluxo interno de água favorecendo o escoamento superficial, principalmente em áreas de maior declividade, o que pode ser intensificado em função do tipo de manejo.

Outro fator limitante é a baixa reserva de nutrientes e, em muitos casos elevada acidez em condições naturais, sendo necessário o emprego de correções, calagem e adubação, para a produção agrícola. Nos Argissolos de textura arenosa no horizonte superficial, a erosão eólica pode ser significativa, principalmente em áreas de relevo plano. Essa textura mais grossa em superfície também reduz a capacidade de retenção de água e acelera a decomposição da matéria orgânica, aumentando a fragilidade do solo em sistemas intensivos, sejam eles de lavouras, pastagens ou silvicultura.

Assim, essa classe de solo, embora não apresente o mesmo potencial agrícola dos Latossolos ou Nitossolos, tem grande importância pela sua ampla distribuição no território estadual. Com manejo adequado, podem ser integrados de forma produtiva a sistemas de agricultura e pecuária, mas sua exploração exige atenção especial às limitações químicas, físicas e morfológicas que os caracterizam.

3. CAMBISSOLOS

A ordem dos Cambissolos (Figura 4) é definida no SiBCS (Santos et al., 2025) pela presença de horizonte diagnóstico subsuperficial incipiente (Bi) não sendo observada a presença de horizonte superficial hístico com mais de 40 cm de espessura, ou horizonte A chernozêmico se o B incipiente apresentar argila de atividade alta (CTC da fração argila maior ou igual a $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ argila) e eutrófico (saturação por bases, V%, maior ou igual a 50). São solos de classes de textura média ou mais argilosa, que possuem baixo grau de desenvolvimento pedogenético e grande diversidade de atributos, podendo ser rasos ou profundos, distróficos ou eutróficos, argilas de atividade alta ou baixa etc. Em função do seu baixo grau de pedogênese, não são relacionados a processos pedogenéticos específicos.

No estado do Maranhão a área ocupada pelos Cambissolos corresponde a cerca de 266 km^2 , sendo observados em diferentes condições de paisagem, desde relevo movimentado até suave ondulado ou plano nos terraços e planícies fluviais e formados a partir de distintos materiais de origem. No estado, as principais subordens observadas são os Cambissolos Háplicos e os Cambissolos Flúvicos.

Quanto às potencialidades e limitações, estas variam em função da natureza do material de origem e posição da paisagem em que se encontram, o que faz que possam ter diferentes usos. A fertilidade natural varia de baixa a alta, bem como a capacidade de retenção de cátions e de armazenamento de água.

Nos Cambissolos Háplicos, localizados em áreas de relevo ondulado ou de maior declividade, além do favorecimento do processo erosivo, é comum a pequena espessura do solo e presença de fragmentos de rocha no B incipiente ou mesmo em superfície, que irá limitar o desenvolvimento do sistema radicular de espécies perenes e reduzir o armazenamento de água. Muitos Cambissolos Háplicos estão localizados em áreas de proteção permanente, devendo ser assim destinados pela sua importância na provisão de outros serviços ecossistêmicos que não a produção de alimentos. Para os Cambissolos Flúvicos, localizados nas planícies fluviais em associação com Neossolos Flúvicos e Gleissolos, as maiores limitações estão associadas à deficiência sazonal de oxigênio, devido ao encharcamento do solo nos períodos de maior precipitação pluviométrica, e, em alguns solos, à baixa fertilidade química natural, sendo, entretanto, de bom potencial para lavouras de ciclo curto e agricultura familiar.



Figura 4 – Perfil de Cambissolo Háplico, em Formosa da Serra Negra - Maranhão. Foto: Marcelino Silva Farias Filho

4. CHERNOSSOLOS

Os Chernossolos constituem uma classe de ocorrência muito restrita no Maranhão, mas de grande interesse pedológico e agrícola em razão de suas propriedades químicas e morfológicas peculiares (Figura 5). A ordem é definida no SiBCS (Santos et al., 2025) pela presença de horizonte diagnóstico superficial A chernozêmico, espesso, com cores escuras, argila de atividade alta e saturação por bases alta. O horizonte A chernozêmico pode estar sobrejacente a horizonte C cálcico, petrocálcico ou carbonático (sequência A – C) ou ainda a um B textural ou B incipiente (sequência A - Bt - C ou A - Bi - C), desde que este apresente argila de atividade alta e seja eutrófico.

Do ponto de vista pedogenético, os Chernossolos resultam principalmente da melanização, evidenciado pelo escurecimento dos horizontes superficiais decorrente da estabilização da matéria orgânica pela formação de humatos de cálcio, levando à formação de cores escuras, mesmo com baixos valores de carbono orgânico total (Kämpf; Curi, 2012). Quando observada a presença de um horizonte B textural, a argiluviação (eluviação/iluviação) soma-se à melanização, reforçando o contraste textural entre os horizontes. Já nos perfis originados de rochas calcárias, o processo pedogenético de carbonatação, caracterizado pelos teores mais elevados de carbonatos no horizonte subsuperficial, ou mesmo em um horizonte C logo abaixo do horizonte superficial, soma-se ao de melanização.

No Maranhão, onde representam menos de 1% do território, observam-se Chernossolos Argilúvicos na porção central do estado, desenvolvidos a partir do intemperismo de calcários existentes na Formação Itapecuru e folhelhos e calcários da Formação Codó, associados a Luvisolos Crômicos e Argissolos Vermelhos.

Quanto à aptidão agrícola, os Chernossolos se destacam como uma das classes mais férteis do estado, com boa disponibilidade de nutrientes e reduzida acidez, além de sua relevância pelo estoque de carbono e elevada capacidade de troca catiônica e de armazenamento de água, decorrentes da argila de atividade alta. Nos solos com elevados teores de carbonatos, pode ocorrer menor disponibilidade de fósforo e de alguns micronutrientes, quando os valores de pH do solo são elevados. No estado, grande parte destes solos localiza-se em áreas declivosas e, quando mal manejados, é comum a remoção do horizonte superficial pelo processo erosivo. Apesar da sua elevada fertilidade natural, as propriedades físicas e a condição de relevo, em geral, tornam esses solos limitantes ao uso agrícola em lavouras intensivas ou mesmo para a silvicultura e pecuária extensiva. Podem apresentar potencial para agricultura familiar, exigindo, porém, manejo apropriado pela suscetibilidade à erosão, que é acentuada em função da distribuição de chuvas no estado do Maranhão.



(a)



(b)



(c)

Figura 5 – Perfil de Chernossolos em Loreto, Maranhão (a) e São José dos Patos, Maranhão (b), e Chernossolo Rêndzico Lítico Fragmentário em Timon, Maranhão (c). Foto: Amanda Alves Sales (a) e (b) – Marcelino Silva Farias Filho (c)

5. ESPODOSSOLOS

De acordo com o SiBCS (Santos et al., 2025), os Espodosolos são definidos pela presença de horizonte B espódico, identificado pela acumulação iluvial de compostos organo-metálicos, geralmente acompanhada de coloração escura ou amarelada em contraste com os horizontes subjacentes. O horizonte diagnóstico pode apresentar-se nas formas Bh (acúmulo iluvial de matéria orgânica), Bs (acumulação de material amorfo, principalmente alumínio, podendo ou não conter ferro) ou Bhs (com acúmulo combinado de matéria orgânica e compostos alumínio, com ou sem ferro) (Figura 6).

Constituem uma das classes de solos de maior relevância ambiental no litoral nordeste do estado do Maranhão, no domínio geomorfológico dos Lençóis Maranhenses, muito embora tenham sido pouco descritos em levantamentos pedológicos anteriores. Contudo, estudos recentes (Dantas et al., 2013; Silva et al., 2020) têm demonstrado que esses solos ocorrem em proporção significativa em áreas de dunas fixas recobertas por vegetação de restinga (Espodosolos Háplicos) (Figura 6a) e em baixadas interdunares sob vegetação campestre e campos higrófilos (Espodosolos Hidromórficos) (Figura 6b), em associação com Neossolos Quartzarênicos. Datações por luminescência opticamente estimulada indicam que os horizontes espódicos da região apresentam idades entre 2.600 e 57.600 anos, evidenciando tanto fases deposicionais distintas quanto formação poligenética de alguns perfis (Santos & Silva, 2009).

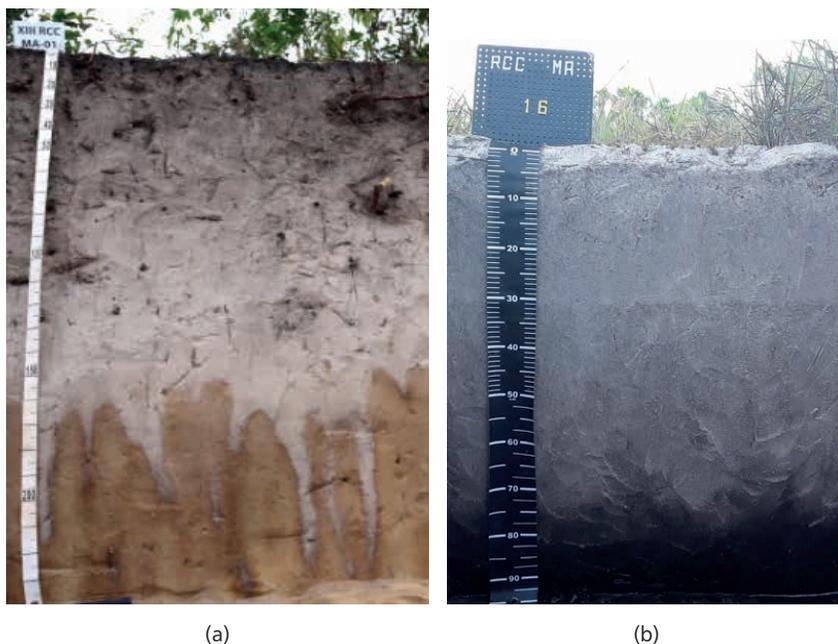


Figura 6 – Perfil de Espodossolo Háplico, município de Icatu (a), e Espodossolo Hidromórfico em Morros (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu (a) e Marlen Barros e Silva (b).

Sua gênese está associada ao processo de podzolização, caracterizado pela mobilização de matéria orgânica e de compostos de alumínio e ferro, os quais são translocados para os horizontes subsuperficiais, originando horizontes espódicos bem desenvolvidos. No estado do Maranhão, onde são observados no litoral leste, são formados a partir de sedimentos arenosos de origem marinha com retrabalhamento eólico.

Trata-se de solos predominantemente distróficos, de baixa fertilidade química natural, elevada acidez e, em alguns perfis, alta saturação por alumínio. A textura arenosa em todo o perfil, com predominância de areia fina sobre a grossa, reflete a contribuição sedimentar costeira, contribui para a baixa retenção de água e nutrientes, favorecendo a rápida decomposição da matéria orgânica e aumentando a sua suscetibilidade à erosão eólica.

As limitações ao uso agrícola desses solos são expressivas, decorrentes da combinação de fatores como baixa fertilidade química, reduzida capacidade de retenção de água, elevada suscetibilidade à erosão e restrições ao crescimento radicular em ambientes hidromórficos, no caso dos Espodossolos Hidromórficos. Apesar disso, práticas agrícolas adaptadas podem permitir o uso sustentável dessas áreas, destacando-se o cultivo de espécies frutíferas adaptadas a solos arenosos, como cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes) e coqueiro-da-baía (*Cocos nucifera*, L.), bem como sistemas agroextrativistas e a criação de pequenos animais. Tais alternativas devem ser associadas a práticas conservacionistas, incluindo fertirrigação, consorciação de culturas e eliminação de queimadas, a fim de mitigar a fragilidade natural desses ambientes.

Nesse contexto, os Espodossolos do Maranhão possuem maior valor ambiental do que agrícola, atuando como reguladores hidrológicos em ecossistemas de restinga e dunas, além de contribuírem para a manutenção da biodiversidade. Contudo, o avanço recente dos estudos pedológicos, como os desenvolvidos na XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (Silva et al., 2020) e em pesquisas acadêmicas, tem permitido compreender melhor a gênese, a distribuição e as restrições agrícolas de uso desses solos, oferecendo subsídios fundamentais para o planejamento territorial, o manejo sustentável e a conservação dos ecossistemas costeiros maranhenses.

6. GLEISSOLOS

A ordem dos Gleissolos, conforme definida pelo SiBCS (Santos et al., 2025), compreende solos minerais que apresentam horizonte subsuperficial glei (Bg ou Cg), caracterizado pelo predomínio de cores acinzentadas na matriz, com ou sem a presença de mosqueados ou variegados em tonalidades mais vivas (Figura 7). Esse

horizonte ocorre imediatamente abaixo de um horizonte A ou de um horizonte superficial H hístico, cuja espessura não é suficiente para enquadrar o solo como Organossolo. Os Gleissolos abrangem diferentes classes texturais, que podem variar em profundidade, apresentando no horizonte glei, sobretudo nos solos mais argilosos, estrutura predominantemente maciça.

A gênese dos Gleissolos está relacionada ao processo específico da gleização, que ocorre sob condições de hidromorfismo, isto é, excesso de água permanente ou periódica no solo, comum em planícies fluviais, baixadas mal drenadas, margens de rios, igarapés e áreas de várzea, onde a água se acumula de forma contínua ou sazonal. Nessas condições, a baixa disponibilidade de oxigênio leva à redução de Fe^{3+} para Fe^{2+} , solúvel e móvel, que pode ser removido através da solução do solo ou precipitar em condições mais oxidadas, formando mosqueados e concreções ferruginosas. Dessa forma, o processo da gleização é influenciado pelos fatores relevo, que contribui para a restrição de drenagem; organismos, que fornecem a matéria orgânica para o processo anaeróbico de redução do ferro; e o clima, que em função da precipitação pluviométrica, influencia nos diferentes graus de gleização.

No Maranhão, onde representam cerca de 4,2% do estado, os Gleissolos, das subordens Háplicos, Sálidos e Tiomórficos, Melânicos, ocorrem na forma de Unidades de Mapeamento em associações ou complexos, especialmente nos campos inundáveis do Golfão e Baixada Maranhenses, constituídos por sedimentos holocênicos, onde ocorrem em associação com Vertissolos, Neossolos Flúvicos e, em menor proporção, com Organossolos Háplicos (Ebeling et al., 2011) (Figura 7). São comuns também nos fundos de vales e planícies fluviais dos principais rios, como Mearim, Itapecuru, Pindaré e Parnaíba, bem como nos ambientes de transição com manguezais, onde predominam Gleissolos Sálidos, Gleissolos Tiomórficos, Gleissolos Háplicos em associação a Organossolos (IBGE, 2011a). Estão fortemente associados à vegetação higrófila, incluindo campos alagados, buritizais (*Mauritia flexuosa*) e matas ciliares.

Quimicamente, os Gleissolos apresentam grande variabilidade. Em várzeas recentes, podem apresentar fertilidade natural relativamente alta, devido ao aporte de sedimentos com elevados teores de nutrientes transportados pelos rios. Em áreas mais antigas, dominam os Gleissolos Distróficos, de baixa fertilidade, com acidez elevada e alta saturação por alumínio. Nas áreas sob influência marinha atual ou pretérita, a presença de sais, de materiais sulfídricos ou horizonte sulfúrico representam sérias limitações ao uso agrícola.

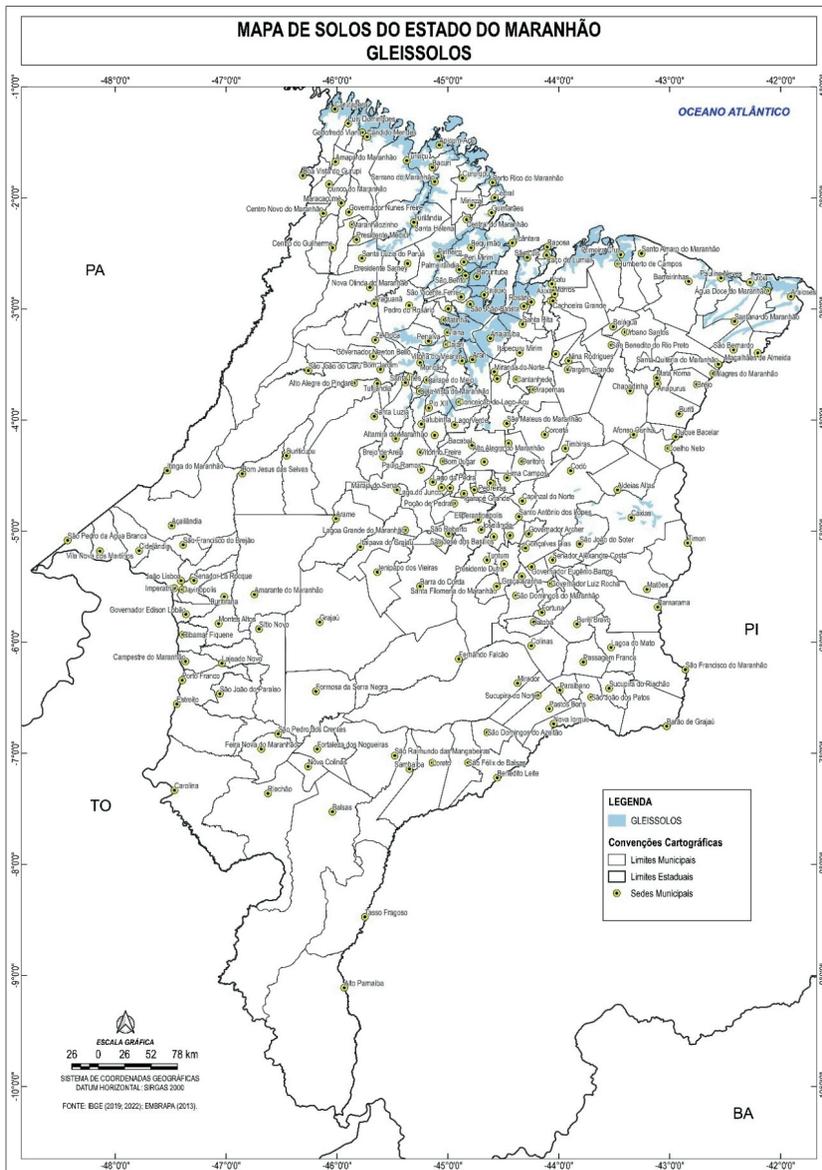


Figura 7 – Distribuição espacial dos Gleissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

Quanto às potencialidades, os Gleissolos Melânicos e Háplicos são aptos ao cultivo de espécies adaptadas a condições úmidas (arroz, açaí, entre outras) ou lavouras de ciclo curto em áreas com drenagem artificial e pastagem natural nos períodos de estiagem. A principal limitação está no excesso de água e consequente deficiência de oxigênio, em especial no período de maior precipitação pluviométrica. Adicionalmente, destacam-se os riscos de compactação e os impedimentos a mecanização nos solos de textura mais argilosa e, nos Gleissolos Sállicos (Figura 8), limitações por salinidade e sodicidade. Nos Gleissolos Tiomórficos, também surge como limitação a elevada acidez, que é intensificada se a área for drenada. Esses solos devem ser preservados como áreas de proteção permanente, pela sua vulnerabilidade e importância para sistemas hidrológicos e preservação de espécies endêmicas. É de grande relevância observar também a legislação ambiental no que se refere à proteção de matas de galeria, limitando o uso à extração do açaí e outras espécies nativas por comunidades tradicionais.



Figura 8– Perfil de Gleissolo Sállico, município de Vitória do Mearim (MA). Foto: Sergio Hideiti Shimizu.

Verifica-se que os Gleissolos representam uma classe de solos de grande relevância ecológica e socioeconômica no estado, ocupando áreas estratégicas para a conservação de recursos hídricos e para o uso agropecuário em várzeas. Embora suas limitações sejam severas, sobretudo no que se refere à drenagem, esses solos podem ser explorados de forma produtiva em sistemas agrícolas e pecuários específicos, desde que manejados com técnicas apropriadas que considerem a sua natureza hidromórfica e sua fragilidade ambiental.

7. LATOSSOLOS

Os Latossolos, um dos solos mais comuns nas regiões tropicais úmidas, representam, em área, a principal classe de solo do Maranhão, correspondente a cerca de 35% do território estadual (Figura 9).

Formados em condições de intensa intemperização química, em áreas altas de relevo plano a suave ondulado, favoráveis à infiltração da água, sob clima quente e úmido, com elevadas taxas de precipitação e temperatura média anual, os Latossolos têm como principais processos pedogenéticos específicos a dessilificação (perda parcial ou total de sílica e bases) e a latossolização, ferralitização ou latolização (acumulação residual de minerais secundários do tipo 1:1 e oxihidróxidos de ferro e alumínio na fração argila) (Kämpf; Curi, 2012).

A ação intensa e continuada desses processos resulta em solos profundos, com pouca diferenciação entre horizontes, drenagem boa a excessiva, ausência ou presença de quantidades traços de minerais primários facilmente intemperizáveis, textura variando de média a muito argilosa, sequência de horizontes A-B-C, com pouca diferenciação entre seus subhorizontes e com horizonte B latossólico (Bw) com espessura mínima de 50 cm (Santos et al., 2025). Adicionalmente, caracterizam-se por uma baixa capacidade de troca de cátions da fração argila (Tb), conjugada com baixos teores de minerais primários facilmente intemperizados e ausência de estruturas da rocha, características que evidenciam o avançado intemperismo desses solos e de seus materiais de origem.

Graças à intensa remoção de bases ocorrida durante a sua gênese, são comumente, de baixa fertilidade química, sendo observado pH ácido e baixa saturação por bases, podendo ser classificados como distróficos ou até alumínicos¹.

¹ Solos com teor de alumínio extraível ≥ 4 cmolc kg⁻¹ e saturação por alumínio $\geq 50\%$.

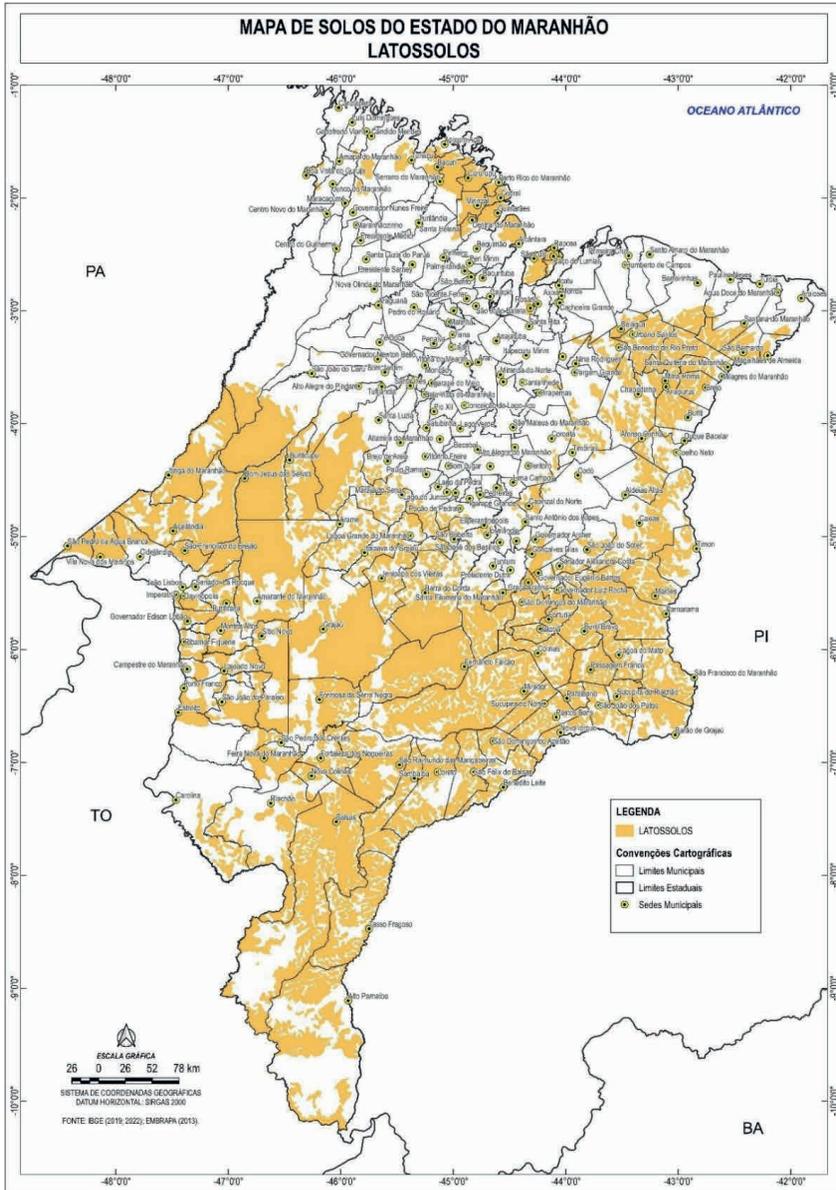


Figura 9 – Distribuição espacial dos Gleissolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

No Maranhão, os Latossolos, das subordens Amarelos (Figura 10a) e Vermelho-Amarelos (Figura 10b), estão distribuídos, sobretudo, na porção centro-sul, no topo plano dos chapadões, recobertos por vegetação de cerrado e campo cerrado, desenvolvidos a partir das formações sedimentares Corda, Pedra de Fogo e Motuca, frequentemente em associação com Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos. Também nos Tabuleiros Costeiros situados no litoral ocidental e na região leste, considerada como a nova fronteira agrícola do Maranhão, nos Tabuleiros relacionados a sedimentos Cenozóicos do Grupo Barreiras, verifica-se a ocorrência de Latossolos Amarelos, comumente com caráter coeso, no topo de baixos platôs, associados a Argissolos Amarelos, também coesos (Dantas et al., 2014). Em menor extensão, ocorrem Latossolos Vermelhos na porção sudoeste do estado, derivados de basaltos da Formação Mosquito, em associação com Nitossolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos, derivados do intemperismo de arenitos da Formação Sambaíba, onde são observados em associação com Neossolos Quartzarênicos.

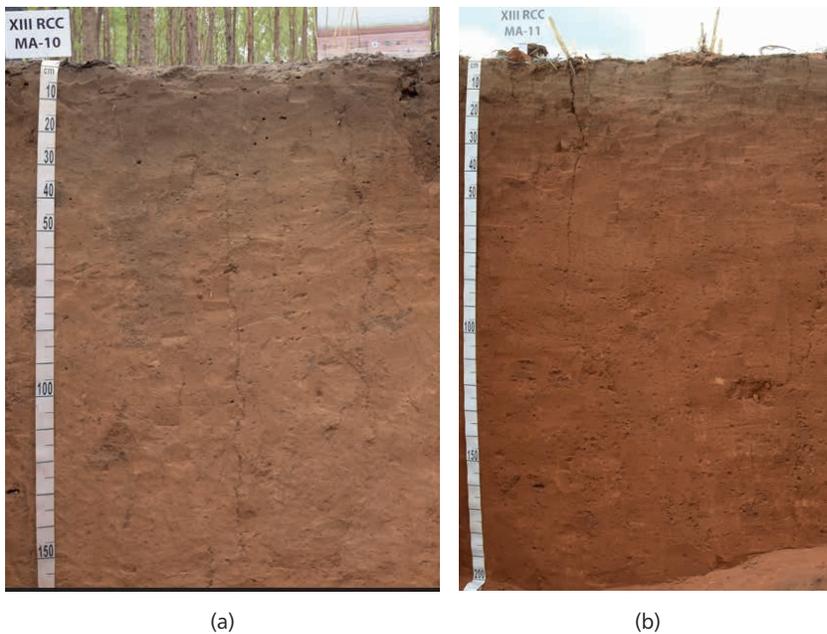


Figura 10 – Perfil de Latossolo Amarelo, em Balsas (a) e Latossolo Vermelho-Amarelo em São Raimundo das Mangabeiras (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.

Em função de suas propriedades físicas favoráveis, representadas por ausência de pedregosidade e rochiosidade, elevado grau de flocculação, profundidade e boa drenagem, apresentam elevado potencial agrícola em especial para as lavouras de grãos, com destaque para a soja. Nas áreas de relevo plano, principalmente no bioma cerrado, possuem elevado potencial para operações agrícolas com mecanização, em sistemas de lavouras, silvicultura ou mistos (silvo-pastoris, integração lavoura-pecuária-floresta).

Quanto às propriedades químicas, em função da baixa reserva de nutrientes, elevada acidez e presença de argilas de baixa atividade, que contribuem para a baixa retenção de cátions, esses solos exigem calagem e adubações para se tornarem produtivos. Nos Latossolos Vermelhos, a fixação de fósforo pode ser uma limitação adicional, exigindo manejo diferenciado deste macronutriente, assim como nos Latossolos com caráter ácrico², que possuem capacidade de troca aniônica.

Embora sejam amplamente utilizados em monoculturas para a produção de grãos e silvicultura, os Latossolos de textura leve, como os Latossolos Amarelos derivados de sedimentos do Grupo Barreiras, são altamente suscetíveis à erosão eólica e hídrica, bem como à degradação, em razão da rápida mineralização da matéria orgânica, o que reduz a capacidade de troca catiônica do horizonte superficial.

Na região conhecida como Matopiba, formada pelos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, a expansão da fronteira agrícola vem promovendo o uso intensivo desses solos, principalmente para a produção de grãos. Essa intensificação, entretanto, levanta preocupações quanto aos impactos ainda pouco estudados sobre o estoque de carbono, as emissões de gases de efeito estufa, a conservação de espécies endêmicas e a manutenção de sistemas hidrológicos, essenciais para a sustentabilidade ambiental e produtiva da região.

Assim, os Latossolos do Maranhão, embora representem a base da ocupação agrícola moderna no estado, exigem manejo técnico criterioso para garantir sua utilização sustentável, conciliando produtividade agrícola, preservação ambiental e manutenção dos modos de vida locais.

8. LUVISSOLOS

Os Luvisolos, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2025), constituem uma ordem definida pela presença de horizonte A ou E, sobrejacente a um horizonte subsuperficial com acúmulo de argila em quantidade suficiente para caracterizar o horizonte diagnóstico B textural (Bt).

² Condição em que o solo apresenta soma de bases trocáveis + alumínio extraível por KCl 1 mol L⁻¹ ≤ 1,5 cmolc kg⁻¹ de argila (Santos et al., 2025).

Formados também pelo processo pedogenético específico da lessivagem ou argiluviação (eluviação/iluviação), assim como os Argissolos, distinguem-se destes por possuírem saturação por bases elevada ($V\% \geq 50$) conjugada com argila de atividade alta ($CTC \geq 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila), não sendo admitida a presença de horizonte A chernozêmico em sua definição. Em sua gênese, fatores como o clima – menos úmido e material de origem – rico em minerais primários, reduzem a intensidade das transformações dos minerais primários e perda de bases e de sílica, resultando em solos eutróficos e com mineralogia de argilas predominantemente de alta atividade.

No Maranhão, onde recobrem cerca de 7% da superfície, os Luvisolos, das subordens Crômicos (Figura 11a) e Háplicos (Figura 11b), apresentam-se distribuídos, sobretudo, na porção central do estado (Figura 12). Desenvolvidos a partir de rochas carbonáticas, fosfáticas ou pelíticas da Formação Itapecuru, do Cretáceo, ou a partir de folhelhos e calcários da Formação Codó (Dantas et al., 2020), encontram-se comumente associados a solos de boa fertilidade química, como Chernossolos Argilúvicos, Argissolos Vermelhos Eutróficos e Vertissolos Háplicos (Dantas et al., 2020).

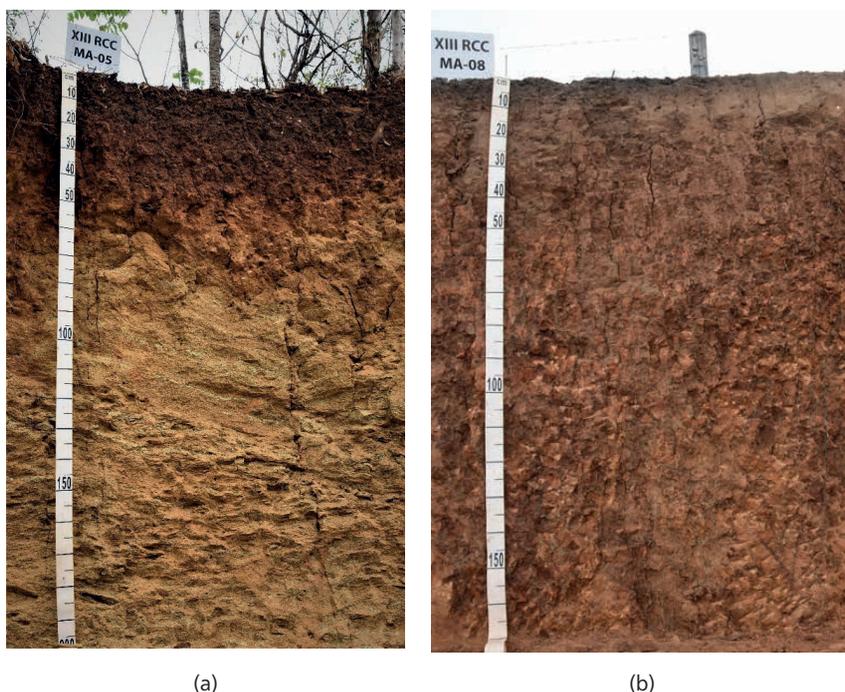


Figura 11– Perfil de Luvisolo Crômico, em São João dos Patos (a) e Luvisolo Háplico em Dom Pedro (b), Maranhão. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.

Quanto à fertilidade natural, destacam-se por apresentar altos teores de cálcio, magnésio e potássio, o que os diferencia da maioria dos solos do estado. Assim, não apresentam limitações químicas significativas para a produção agrícola, sendo considerados solos de alta a média fertilidade natural. No entanto, a suscetibilidade à erosão, devido ao horizonte B textural, mudança textural abrupta e relevo declivoso, e impedimentos à mecanização pela presença de pedregosidade sobre a superfície e/ou na massa do solo, são fortes limitantes ao seu uso, em especial para lavouras de grãos e mecanizadas. Em Luvisolos de menor espessura e mais argilosos, a expansão e contração devida à presença de argilas de alta atividade, pode ser um forte limitante para lavouras perenes e silvicultura.

Portanto, os Luvisolos do Maranhão, embora apresentem potencial agrícola elevado pela fertilidade natural, exigem práticas conservacionistas rigorosas e planejamento de uso compatível com suas limitações. O manejo adequado deve considerar técnicas de controle de erosão, uso de culturas adaptadas às condições de solo e relevo, além da adoção de sistemas agroflorestais em áreas de maior risco ambiental.

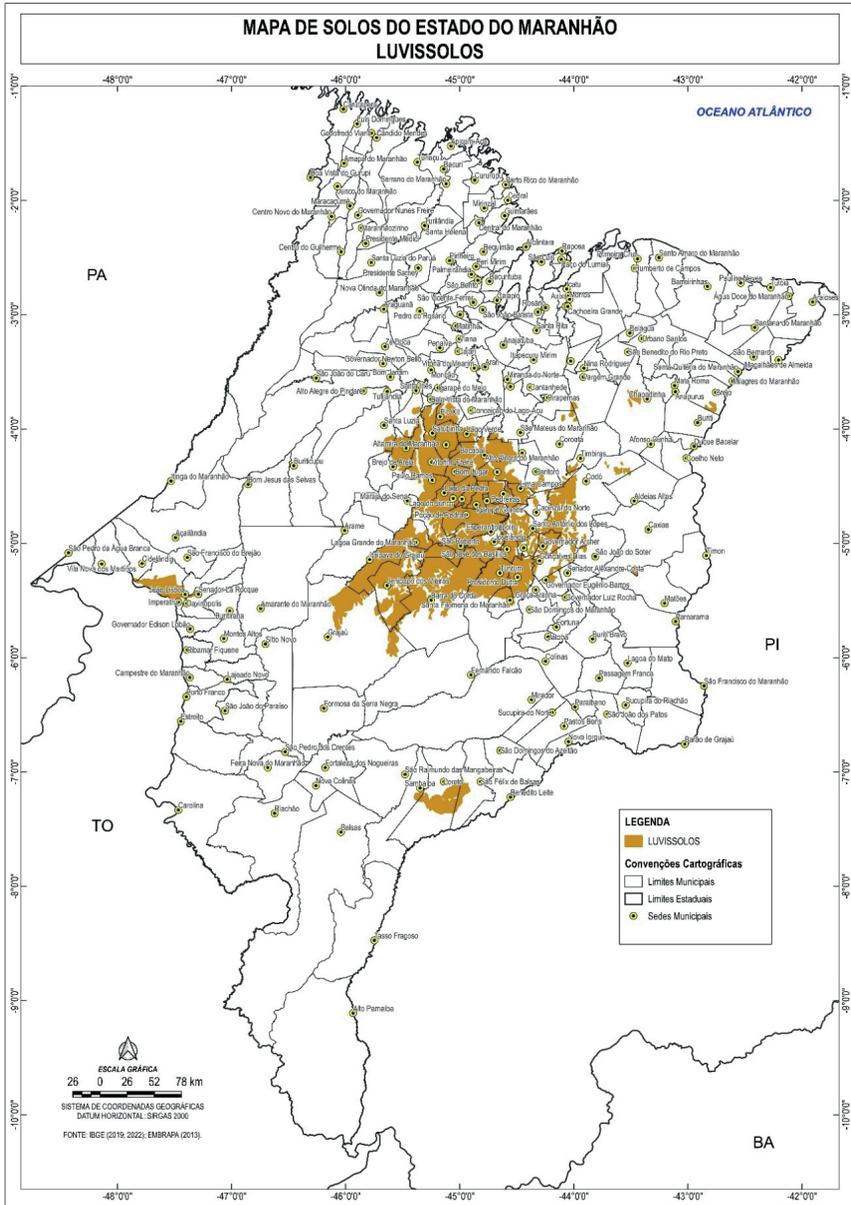


Figura 12 – Distribuição espacial dos Luvissois no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

9. NEOSSOLOS

A ordem dos Neossolos é definida no SiBCS (Santos et al., 2025) pela ausência de horizonte diagnóstico subsuperficial. A pequena diferenciação de horizontes no perfil, com A seguido de C ou R, ou Bi com espessura menor que 10 cm, e o predomínio de características herdadas do material originário, que pode ser rocha ou sedimentos, são indicativos do baixo grau de evolução pedogenética. Quando ocorre um horizonte orgânico (O) sobre a rocha (R) este não possui espessura para atender aos Organossolos, ou ainda, se o A é chernozêmico não atende a exigência de carbonatos para Chernossolos.

O baixo grau de intemperismo resulta da ação de diferentes fatores que, isoladamente ou em conjunto, retardam a formação dos solos. Podem ser listados: a elevada resistência ao intemperismo do material de origem; clima árido ou mesmo semiárido; relevo com declives acentuados que propiciam as perdas por erosão e desfavorecem a infiltração da água reduzindo o intemperismo; curto tempo de exposição da rocha ou ainda a recente deposição de sedimentos. Dessa forma, os processos múltiplos de adição, translocação, transformação e perda ocorrem de forma restrita ou diferenciada, originando solos de ampla variabilidade e baixo grau de desenvolvimento pedogenético.

No estado do Maranhão, os Neossolos ocupam cerca de 14% da superfície, estando distribuídos em diferentes compartimentos geomorfológicos (Figura 13). As principais subordens identificadas são os Neossolos Litólicos (8%), os Neossolos Quartzarênicos (cerca de 8%) e os Neossolos Flúvicos (0,5%), além da ocorrência restrita de Neossolos Regolíticos, estes últimos reconhecidos com menor expressão. A distribuição espacial das subordens está fortemente associada ao relevo, ao regime hídrico e à natureza do material parental.

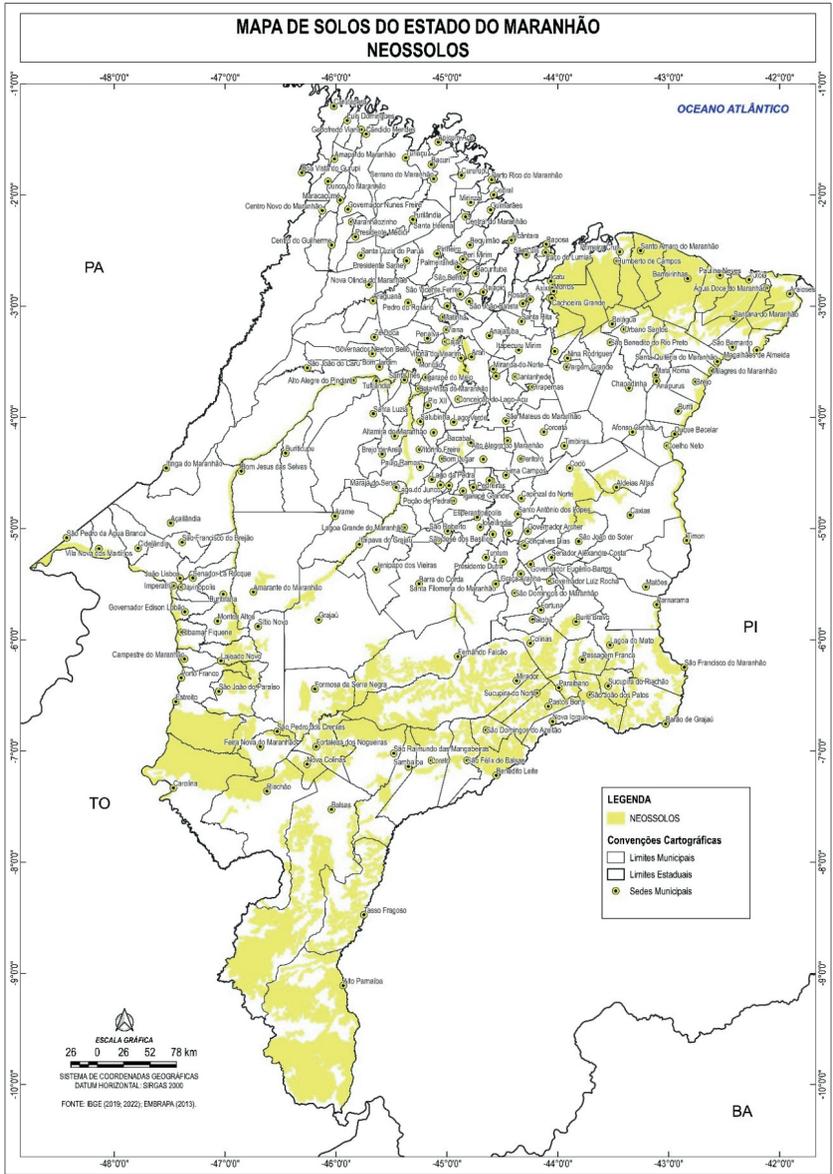


Figura 13 – Distribuição espacial dos Neossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

9.1. Neossolos Litólicos

Os Neossolos Litólicos ocorrem, sobretudo, nas vertentes escarpadas dos chapadões do sul e sudeste do estado, onde derivam do intemperismo de rochas sedimentares. Apresentam perfil raso, com sequência A-R, muitas vezes contendo fragmentos de rocha e afloramentos frequentes. A pequena profundidade efetiva restringe o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água, constituindo limitação severa ao uso agrícola. Adicionalmente, a associação de relevo declivoso e horizonte superficial pouco espesso favorece a erosão, tornando essas áreas mais adequadas ao uso com pastagens nativas, extrativismo vegetal e conservação ambiental do que para a agricultura mecanizada.

9.2. Neossolos Flúvicos

Os Neossolos Flúvicos, com sequência de horizontes A-C e material de origem de sedimentos fluviais, embora de fertilidade natural, granulometria e mineralogia variada, possuem, em geral, potencial para agricultores familiares, principalmente lavouras de ciclo curto. Frequentemente em associação com Gleissolos Hápicos, em planícies aluviais e fundos de vales, apresentam como principais limitações agrícolas riscos de inundação no período das chuvas, o que pode levar a problemas com deficiência de oxigênio e impedimentos à mecanização, mais severos para lavouras perenes e silvicultura. Vale destacar a necessidade de observar a legislação ambiental no que se refere à faixa de proteção da mata ciliar.

9.3. Neossolos Quartzarênicos

De textura essencialmente arenosa, das classes areia e areia franca até 200 cm de profundidade (Santos et al., 2025), os Neossolos Quartzarênicos ocupam maiores extensões na faixa litorânea, onde derivam de depósitos arenosos do Quaternário, nos topos dos chapadões do sul do estado, em associação com Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos sob vegetação de cerrado e campo-cerrado e na região das Chapadas das Mesas, no sudoeste maranhense, derivados de arenitos eólicos da Formação Sambaíba. Sua textura arenosa confere baixa capacidade de troca catiônica (CTC), baixa capacidade de retenção de água e alta suscetibilidade à lixiviação de nutrientes. Tais características tornam os Neossolos Quartzarênicos restritos para culturas de sequeiro. Em áreas de expansão agrícola no cerrado maranhense, têm sido explorados mediante sistemas altamente dependentes de irrigação, correção da acidez e adição intensiva de insumos. Entretanto, a fragilidade ambiental desses solos levanta preocupações quanto à contaminação de aquíferos e à degradação acelerada pela rápida mineralização da matéria orgânica

10. NITOSSOLOS

Os Nitossolos constituem uma classe de solos de ocorrência restrita no Maranhão, mas de grande relevância agrícola, devido às suas excelentes propriedades físicas e químicas.

A ordem dos Nitossolos é definida no SiBCS (Santos et al., 2025) pela textura argilosa, com 350 g kg^{-1} ou mais de argila, inclusive no horizonte A, e por horizonte subsuperficial de acúmulo de argila, denominado B nítico, com estrutura de grau moderado ou forte do tipo blocos subangulares ou angulares ou prismática, com cerosidade expressiva e/ou caráter retrátil. Os Nitossolos são ainda profundos, com pequena variação de textura e cor ao longo do perfil, bem drenados, e com elevada estabilidade estrutural, características que os distinguem de outras classes de solos argilosas (Figura 14).

A gênese dos Nitossolos está vinculada ao intemperismo de rochas básicas e intermediárias através do processo pedogenético específico da rubificação ou rubefação, que ocorre em climas quentes com alternância de estações secas e úmidas, levando à alteração de hidróxidos de ferro de baixa cristalinidade com a formação de cristais de hematita e goethita, conferindo aos solos cores vermelhas (Kubiena, 1970). Dessa forma, entre os principais fatores de formação desta classe de solos destacam-se: o material de origem – rico em minerais básicos; o relevo, favorável a uma boa drenagem e translocação de argila; e o clima, cuja precipitação pluvial contribui para a intemperização dos minerais primários e deposição da argila nos poros e agregados, levando à formação da cerosidade.



(a)



(b)

Figura 14 – Perfil de Nitossolo Vermelho, município de Campestre do Maranhão (MA) (a); cerosidade na superfície de um agregado estrutural em Nitossolo. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.

No Maranhão, onde correspondem a apenas 1,6% da área (Jacomine et al., 1986) (Figura 15), os Nitossolos Vermelhos encontram-se correlacionados ao afloramento de rochas vulcânicas: basaltos da Formação Mosquito, no sudoeste do estado, onde ocorrem associados a Latossolos Vermelhos em áreas de relevo plano a suave ondulado; e diabásios da Formação Sardinha, a sudeste, onde se encontram em associação com Luvisolos.

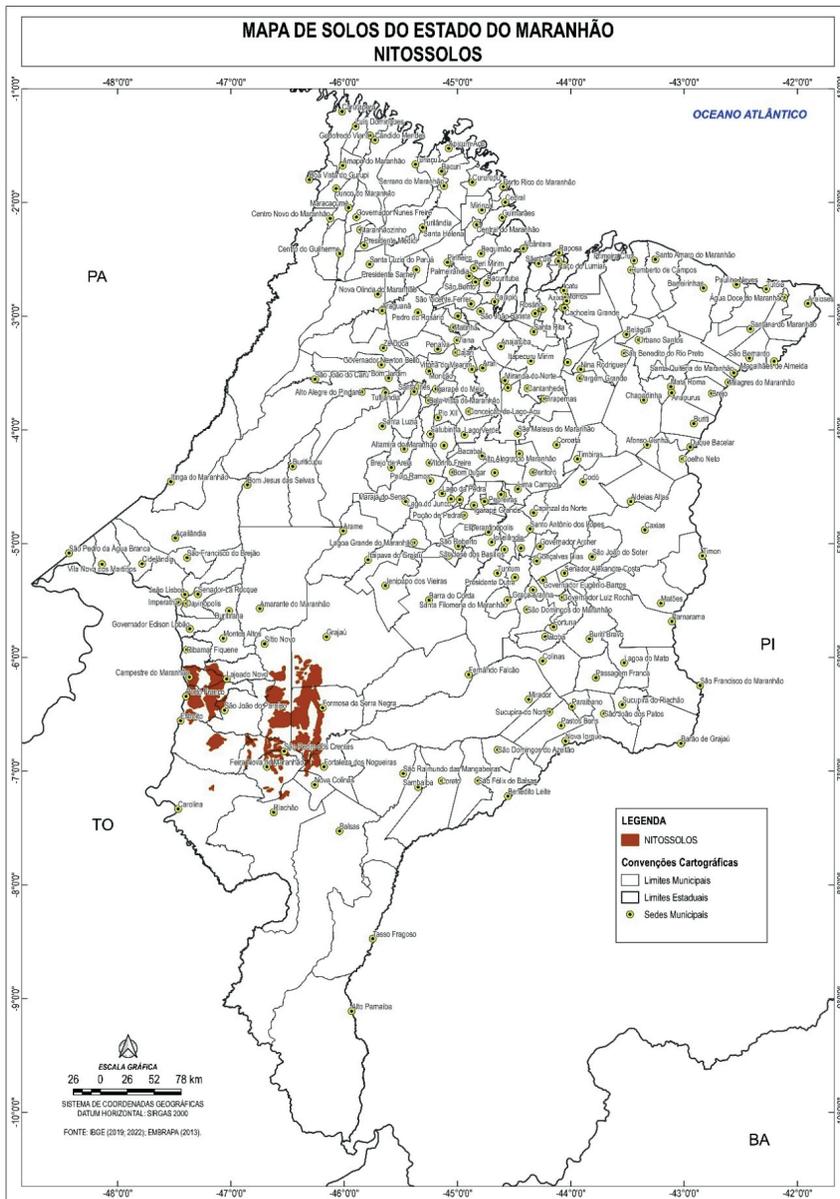


Figura 15 – Distribuição espacial dos Nitossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

Quimicamente, os Nitossolos apresentam como principais características: elevada fertilidade natural, capacidade de troca catiônica moderada a alta, saturação por bases variável e pH variando de ligeiramente ácido a neutro, o que permite ampla adaptação a diferentes culturas agrícolas, mesmo com níveis relativamente baixos de insumos. Do ponto de vista físico, destacam-se pela alta estabilidade estrutural e profundidade, que contribuem tanto para o armazenamento de água quando para o desenvolvimento do sistema radicular.

Quanto ao uso e manejo, os Nitossolos possuem elevada aptidão agrícola, sendo recomendados para culturas anuais, como milho, soja, arroz e feijão, bem como para culturas perenes, como café, cana-de-açúcar e fruticultura diversificada. Também apresentam grande potencial para sistemas integrados de produção agropecuária, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). No entanto, esses solos, quando localizados em áreas de relevo mais acidentado, apresentam risco de erosão hídrica, intensificado pelo gradiente textural (ainda que menor que o observado para os Argissolos e Luvisolos) e pelo manejo inadequado. Além disso, devido ao maior teor de argila, são suscetíveis à compactação pelo pisoteio em pastagens. Práticas conservacionistas, como terraceamento, cultivo em nível, manutenção da cobertura vegetal e rotação de culturas, são essenciais para preservar a fertilidade e a sustentabilidade desses solos.

Em resumo, embora espacialmente restritos no estado, os Nitossolos representam um recurso pedológico de elevado valor agrícola, combinando profundidade, boa drenagem, alta fertilidade natural e excelente estrutura física, o que os coloca entre os solos mais produtivos, desde que adequadamente manejados.

11. PLANOSSOLOS

A ordem dos Planossolos é definida no SiBCS (Santos et al., 2025) como solos imperfeitamente drenados, com marcante mudança textural entre o horizonte superficial (A) ou eluvial (E) e o horizonte subsuperficial (B) subjacente (Figura 16). O horizonte B de acúmulo de argila é denominado de B plânico que possui cores acinzentadas ou a presença de cores mosqueadas ou variegadas, decorrentes da permeabilidade lenta, que resulta em uma zona de acumulação de água (lençol freático suspenso) entre os horizontes. No horizonte B plânico pode ser observada estrutura em blocos de tamanho grande, prismática ou até mesmo colunar e maciça nos solos com elevado teor de sódio (Na^+).

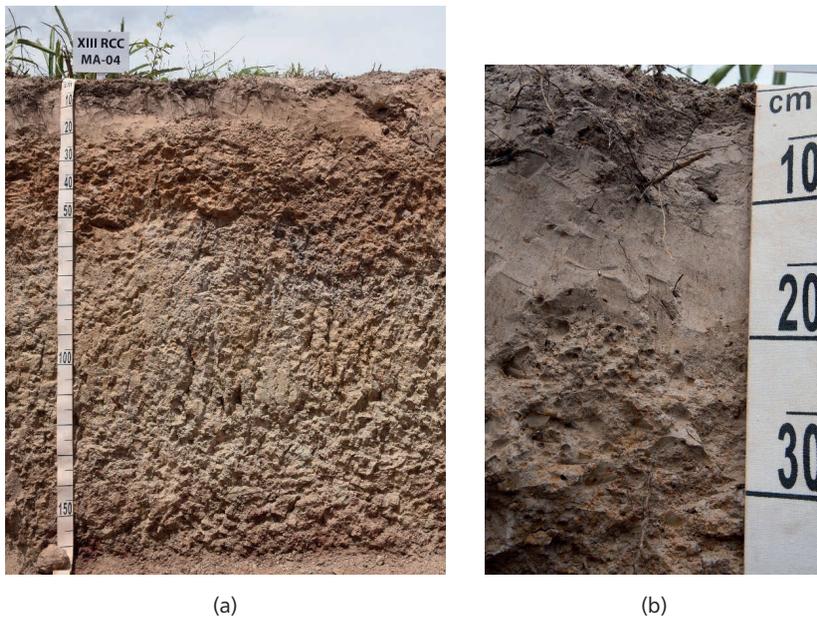


Figura 16 – Perfil de Planossolo Háplico, município de São Mateus do Maranhão (MA) (a); detalhe da transição abrupta entre os horizontes E e 2Btgcf. Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.

Os Planossolos se desenvolvem a partir de dois processos pedogenéticos específicos principais: a lessivagem, caracterizada pela intensa translocação de argila que resulta na formação de um horizonte E bem definido, e a ferrólise, na qual ocorre acidificação e destruição das argilas dos horizontes superficiais através de hidromorfismo temporário (Mafra et al., 2001). Como fatores destacam-se o clima, com maior precipitação pluviométrica ao menos em parte do ano, e o relevo plano a suave-ondulado que condiciona a drenagem impedida e as cores acinzentadas. Quanto aos processos múltiplos, alternam-se as perdas de ferro para o lençol freático, nos períodos mais chuvosos, e a adição deste elemento e posterior translocação e precipitação em partes do perfil com a formação de mosqueados.

Quanto às subordens são verificados os Planossolo Nátricos e os Háplicos. Nos Planossolos Nátricos, além dos processos anteriormente listados, destaca-se o processo de solonização, com saturação por Na $\{(Na/T)*100\}$ superior a 15% e pH alcalino. Para o desenvolvimento desse processo, destaca-se a influência do fator clima (mais seco), contribuindo para a adição e translocação do sódio no solo a partir do lençol freático ou lateralmente na paisagem.

Os Planossolos Háplicos correspondem a apenas 0,3% do mapa de solos do estado do Maranhão, já os Planossolos Nátricos têm expressão ainda menor ocorrendo apenas como inclusões em algumas unidades de mapeamento.

Os Planossolos apresentam como limitações a baixa permeabilidade, que favorece o acúmulo de água no horizonte superficial e, portanto, aumenta a deficiência de oxigênio, além de impedir o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade. Nos Planossolos Nátricos os altos teores de sódio e a elevação de pH acarretam fortes limitações por fertilidade e até mesmo deficiência de água no período seco. Os Planossolos Háplicos podem ser utilizados com pastagens ou culturas de ciclo curto e ainda lavouras adaptadas a condições de hidromorfismo, como exemplo o arroz.

No Maranhão, os Planossolos representam uma classe de ocorrência restrita, mas ambientalmente relevante, por se localizarem em áreas de transição e apresentarem forte interação com os regimes hidrológicos locais. Seu manejo exige planejamento cuidadoso, privilegiando práticas conservacionistas, sistemas de cultivo adaptados ao encharcamento e uso sustentável em áreas com maior fragilidade ambiental.

12. PLINTOSSOLOS

Formados pelo processo pedogenético específico da plintitização, caracterizados pela presença de horizonte subsuperficial plíntico (Bf ou Cf), concrecionário (Bcf) ou litoplíntico (F), subjacente a um horizonte A ou E, geral e drenagem imperfeita a má, os Plintossolos representam, em extensão, a terceira maior classe de solo do Maranhão (cerca de 15% do território) (Jacomine et al., 1986).

Na plintitização, processo pedogenético responsável pela formação da plintita - uma mistura de argila, pobre em carbono orgânico e rica em ferro, ou em ferro e alumínio (Santos et al., 2025)-, destacam-se dois mecanismos principais: (i) a transformação do ferro por meio de reações de oxirredução e (ii) a translocação do ferro reduzido, seguida de sua precipitação. Esses processos são condicionados, sobretudo, por dois fatores determinantes: o material de origem, como fonte de ferro, e o clima (atual ou pretérito), que controla tanto a mobilização quanto a concentração do ferro no perfil, resultando no acúmulo deste elemento na forma de plintita. Quando submetida a ciclos de dessecação, a plintita pode se transformar em petroplintita, que é utilizada na identificação do horizonte concrecionário (subscrito c), ou, após um longo tempo, no horizonte litoplíntico, no qual ocorre a coalescência da petroplintita formando um horizonte contínuo ou praticamente contínuo, identificado pela letra F.

No Maranhão, na gênese dos Plintossolos, destaca-se a contribuição dos arenitos ferruginosos da Formação Itapecuru, do Cretáceo, em áreas de relevo plano a suavemente ondulado na porção centro-norte do estado (Figura 17), recobertas por babaquais

da “mata dos cocais”, onde o clima, caracterizado por forte variação sazonal, com dois períodos bem definidos — um chuvoso, de novembro a abril, e um seco, de maio a outubro, favorece a dinâmica de redução e oxidação do ferro, levando à segregação deste elemento e à formação da plintita (f). Características importantes a serem ressaltadas sobre os Plintossolos relacionados à Formação Itapecuru, são os elevados conteúdos de silte ($> 300 \text{ g kg}^{-1}$), comumente superiores aos de argila e, conseqüentemente, elevada relação silte/argila. Outra característica marcante é a argila de atividade alta, além de teores de magnésio (Mg^{2+}) geralmente superiores aos de cálcio (Ca^{2+}), sobretudo, em subsuperfície (Anjos et al., 1995; 2007; Silva et al., 2020).

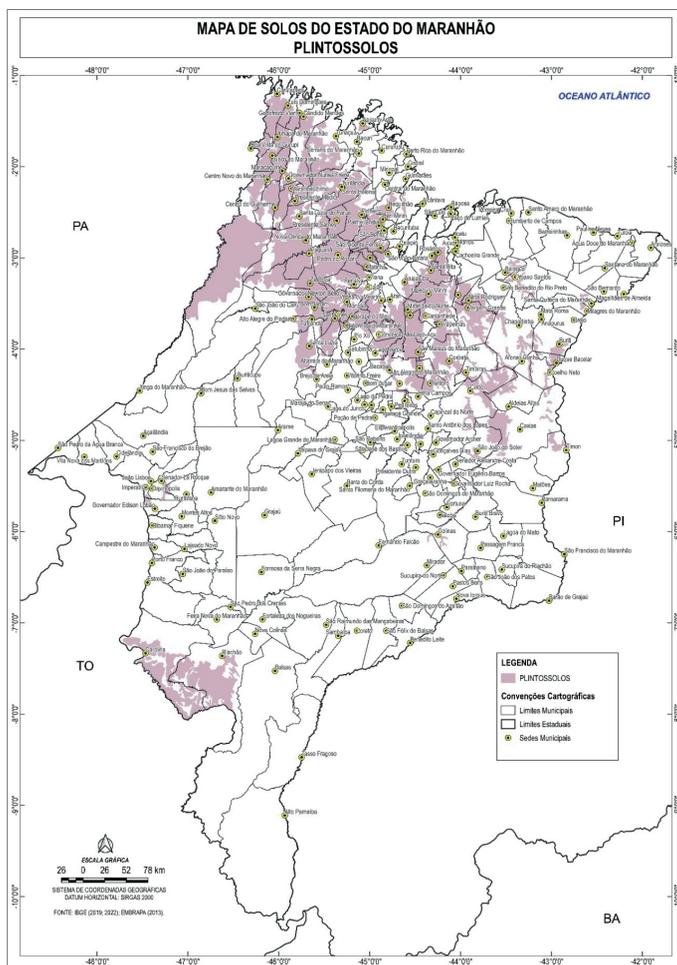


Figura 17 – Distribuição espacial dos Plintossolos no estado do Maranhão. Elaboração: Conceição Filho, J. F. da.

As três subordens de Plintossolos reconhecidas no SiBCS (Santos et al., 2025) são encontradas no estado: os Plintossolos Argilúvicos (Figura 18a), representando cerca de 9,6% do território, os Plintossolos Pétricos (Figura 18b), correspondendo a, aproximadamente, 6,9% da área e os Plintossolos Háplicos (Figura 18c), compreendendo cerca de 2,6% da área. Quanto à distribuição espacial, os Plintossolos Argilúvicos são encontrados, sobretudo, na região rebaixada entre o Golfão Maranhense e a divisa do estado do Pará, recoberta pela Mata dos Cocais, em associação com Argissolos Vermelho-Amarelos, ambos distróficos, de baixa fertilidade química natural. Já os Plintossolos Pétricos distribuem-se, sobretudo, a leste do estado, na região do Baixo Parnaíba, recoberta originalmente por vegetação de floresta tropical caducifólia, frequentemente em associação com Planossolos Háplicos e Argissolos Vermelho Amarelos plintossólicos (Dantas et al., 2020), enquanto Plintossolos Háplicos se distribuem nas demais regiões do estado, sobretudo, nos bordos das chapadas e chapadões em associação com Plintossolos Pétricos (Jacomine et al., 1986; Dantas et al., 2013), bem como em jovens superfícies aplainadas, desenvolvidas a partir dos atuais fundos de vales (IBGE, 2011).

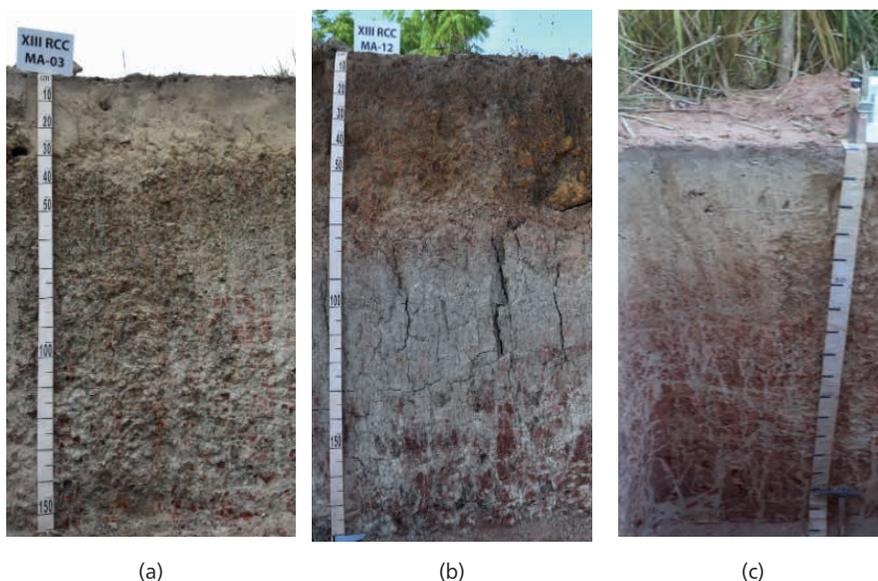


Figura 18 – Perfil de Plintossolo Argilúvico (a), Plintossolo Pétrico (b) e Plintossolo Háplico (c), respectivamente, nos municípios de Itapecuru-Mirim, Igarapé do Meio e Santa Inês (MA). Fotos: Sergio Hideiti Shimizu (a) e Marlen Barros e Silva (b, c).

Do ponto de vista agrícola, os Plintossolos apresentam limitações importantes, como baixa fertilidade natural, na grande maioria, deficiência de oxigênio (nos Argilúvicos e Háplicos), suscetibilidade à erosão (principalmente nos Argilúvicos) e restrições à mecanização e ao desenvolvimento radicular (nos Pétricos, devido à presença de petroplintita). Apesar disso, podem ser aproveitados em sistemas agroflorestais, especialmente os Argilúvicos e alguns Háplicos com melhor drenagem, e em cultivos tolerantes à umidade, como o arroz, em áreas de relevo plano e com drenagem impedida. Também são aproveitados para pastagens naturais ou manejadas durante o período seco.

Algumas áreas de Plintossolos são muito importantes para a proteção dos babaçuais (*Attalea speciosa* Mart.), palmeira nativa de relevante interesse para comunidades tradicionais maranhenses, como as quebradeiras de coco babaçu, que desempenham papel crucial na manutenção da cultura tradicional e na conservação ambiental, mas enfrentam pressões da expansão agropecuária.

13. VERTISSOLOS

Apesar de sua ocorrência restrita no Maranhão (< 1%) (Jacomine et al., 1986), os Vertissolos constituem uma classe de solos de grande relevância pedológica e agrícola em áreas específicas do estado.

A ordem dos Vertissolos, definida no SiBCS (Santos et al., 2025) pela presença do horizonte diagnóstico vértico (Biv ou Cv) e pela textura argilosa ou com no mínimo, 300g de argila kg⁻¹ de solo no horizonte A, tem sua gênese intimamente relacionada a materiais ricos em minerais 2:1 expansivos, principalmente a esmectita, resultantes do intemperismo de rochas básicas, ultrabásicas, margas, calcárias ou de depósitos argilosos recentes de origem flúvio-lacustre. Em geral compreende solos rasos ou pouco profundos e com drenagem que varia de imperfeita a mal drenados, em função do período das chuvas.

O processo pedogenético específico é o da vertização, que tem como principais fatores de formação o material de origem, o clima e o relevo, e é caracterizado por variações pronunciadas de volume do solo em função da variação do conteúdo de água entre os períodos chuvoso e seco. Na estação seca, a retração da massa argilosa provoca a formação de fendas largas e profundas (com mais de 30 cm de profundidade e 1 cm de largura); já durante a estação chuvosa, a expansão das argilas fecha essas fendas e promove o revolvimento interno do solo, originando as típicas estruturas cuneiformes e paralelepípedicas e evidências de movimentação da massa do solo sob a forma de superfícies de fricção ("slickensides") e superfícies de compressão. Esse processo confere aos Vertissolos características morfológicas e físicas muito peculiares, como baixa diferenciação de horizontes (seqüência de horizontes A-Cv ou A-Biv-Cv), elevada plasticidade, pegajosidade acentuada, quando úmidos, e grande dureza quando secos, além da ocorrência de microrrelevo "gilgai".

No Maranhão, os Vertissolos ocorrem em manchas localizadas sobretudo na região sudoeste do estado, em áreas associadas aos basaltos da Formação Mosquito, onde Vertissolos Ebânicos aparecem em associação com Nitossolos Vermelhos e Latossolos Vermelhos. Na Baixada Maranhense, derivados de depósitos argilosos fluvio-marinhos, em áreas de relevo plano a suavemente ondulado, frequentemente com presença de salinidade e/ou tiomorfismo em um ou mais horizontes, verificam-se Vertissolos Hidromórficos, associados a Gleissolos Sálcos ou Tiomórficos, enquanto na porção central do estado, em áreas correlacionadas ao afloramento de folhelhos e calcários da Formação Codó, verificam-se Vertissolos Háplicos.

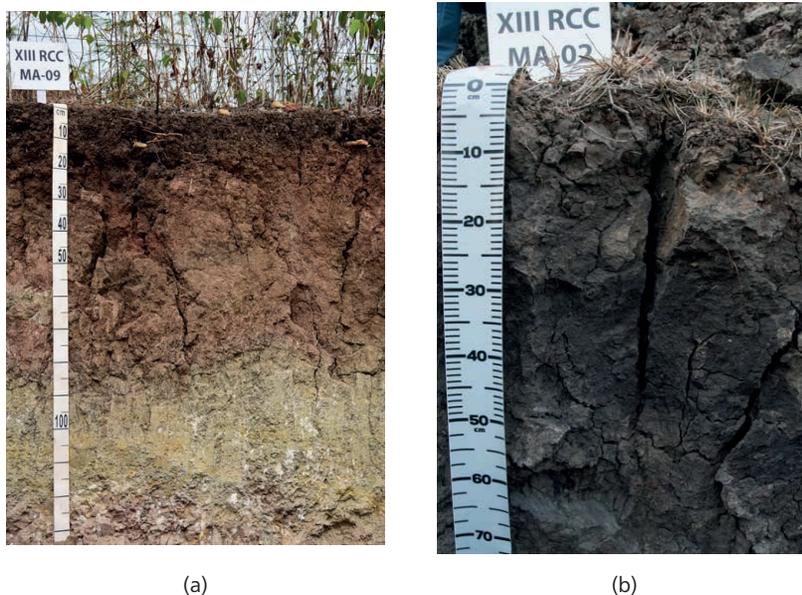


Figura 19 – Perfil de Vertissolo Háplico, município de Presidente Dutra (a) e Vertissolo Hidromórfico, município de Bacabeira (MA). Fotos: Sergio Hideiti Shimizu.

Do ponto de vista químico, os Vertissolos, sobretudo os Ebânicos e Háplicos, apresentam alta fertilidade química natural, com elevados valores de capacidade de troca catiônica e saturação por bases, pH neutro a ligeiramente alcalino e relativamente boa disponibilidade de nutrientes, o que os torna potencialmente favoráveis à agricultura. Os Vertissolos Hidromórficos da Baixada e Golfão Maranhenses, entretanto, apresentam limitações devido à presença de salinidade e até sodicidade, ou até mesmo potencial de tiomorfismo. Do ponto de vista físico, os Vertissolos apresentam limitações importantes relacionadas principalmente à

sua dinâmica: na seca, as fendas abertas provocam a ruptura de raízes, diminuindo a absorção de água e nutrientes e favorecendo o ataque de patógenos, além de prejudicarem a mecanização agrícola; na estação chuvosa, a grande expansividade e a elevada pegajosidade reduzem a trafegabilidade de máquinas, dificultando o preparo do solo. Além disso, em áreas de relevo plano a suave-ondulado, durante a estação chuvosa, a baixa condutividade hidráulica saturada favorece a criação de lâmina d'água na superfície, limitando ainda mais a mecanização e o cultivo de espécies mais sensíveis à deficiência de oxigênio.

Por suas características, sobretudo, físicas, os Vertissolos são recomendados para culturas anuais tolerantes às variações de umidade, como milho, feijão, sorgo e especialmente o arroz em áreas de drenagem mais deficiente, sendo ainda indicados para pastagens naturais e cultivadas. Contudo, seu aproveitamento agrícola exige práticas de manejo específicas, incluindo o planejamento cuidadoso das operações mecanizadas para evitar o tráfego excessivo em períodos de elevada umidade. Por outro lado, fornecem importantes serviços ecossistêmicos, para espécies de plantas e animais e para as comunidades locais, principalmente nos ambientes de deltas e das planícies costeiras, o que leva à recomendação de seus mapeamentos detalhados e sua destinação como áreas de preservação ou uso de baixa intensidade com culturas anuais adaptadas e pastagem natural.

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise detalhada da diversidade pedológica encontrada no estado do Maranhão, conforme abordada neste capítulo, evidencia a estreita relação entre os processos pedogenéticos e as particularidades geoambientais e climáticas do Maranhão. A predominância de Latossolos e Argissolos, dentre as principais classes de solos do Maranhão, reflete um avançado estágio de intemperismo do ambiente e evidencia o potencial agrícola desses solos, especialmente na região dos Cerrados – área de expansão da fronteira agrícola do Estado. Contudo, suas limitações químicas e a susceptibilidade à degradação, especialmente em monoculturas, exigem um manejo técnico rigoroso e conservacionistas da matéria orgânica do solo e a retenção de água, a exemplo dos cultivos rotacionados, plantio direto e ILP/ILPF (integração lavoura-pecuária/integração lavoura-pecuária-floresta). Por outro lado, a ocorrência de solos com características específicas, como os Luvisolos, de alta fertilidade natural; os Gleissolos, associados a ambientes de várzeas; os Espodosolos, de grande valor ecológico em zonas costeiras; e os Plintossolos, que ocorrem em grande parte desse território (3a. classe de solo de maior ocorrência no Estado) e que são muito importantes na manutenção das florestas de babaquais, típicas do estado, mas com limitações severas de uso, devido à sua natureza concrecionária, demonstra a complexidade pedológica do estado do Maranhão, demandando estratégias de uso

da terra diferenciadas e específicas, tendo em vista não apenas o potencial agrícola dos solos, mas também seu papel ambiental, na produção de serviços ecossistêmicos e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. A compreensão dos atributos físicos, químicos e morfológicos de cada classe de solos e de suas variedades, em conjunto com os fatores de formação dos solos, é fundamental para o planejamento territorial e para a implementação de políticas públicas, a exemplo do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). As considerações apresentadas por esse documento e outros estudos de solos e seus ambientes, reforçam a necessidade de conciliar a expansão da fronteira agrícola do Estado com boas práticas de manejo e conservação dos solos, minimizando impactos ambientais e garantindo a sustentabilidade a longo prazo, para além da produtividade agrícola.

Em síntese, o conhecimento aprofundado da gênese e da distribuição espacial dos solos do Maranhão e de seus atributos, não é apenas uma base para a pesquisa científica, mas um instrumento estratégico e crucial para garantir o desenvolvimento sustentável do Estado, permitindo uma gestão territorial com conhecimento de seus recursos naturais e edáficos, face aos desafios ambientais e socioeconômicos do planeta.

REFERÊNCIAS

ANJOS, L. H. C. dos et al. Formation of soils with plinthite on a toposequence in Maranhão state, Brazil. *Geoderma*, v. 64, n. 3-4, p. 257-279, 1995.

ANJOS, L. H. C. dos et al. Caracterização e classificação de Plintossolos no município de Pinheiro-MA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 5, p. 1035-1044, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500020>.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I. C. N.; SOUZA, L. V. de; RENK, J. F. C. Compartimentação geomorfológica. In: BANDEIRA, I. C. N. (org.). *Geodiversidade do estado do Maranhão*. Teresina: CPRM, 2013. p. 33-60. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/14761/livro_geodiversidade_MA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

DANTAS, J. S.; MARQUES-JÚNIOR, J.; MARTINS-FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 4, p. 1039-1050, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v38n4/01.pdf>.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C. dos; PEREZ, D. V.; PEREIRA, M. G.; GOMES, F. W. F. Atributos químicos, carbono orgânico e substâncias químicas em Organossolos de várias regiões do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 2, p. 325-336, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbcs/v35n2/v35n2a04.pdf>.

IBGE. Mapa exploratório de solos do estado do Maranhão. Rio de Janeiro, 2011a. 1 mapa, color. Escala 1:400.000. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/ma_pedologia.pdf.

JACOMINE, P. K. T. et al. Estudo expedito de solos no Estado do Maranhão para fins de classificação, correlação e legenda preliminar. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS; Recife: SUDENE-DRN, 1980. 220 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim técnico, 61; SUDENE-DRN. Série Recursos de solos, 13). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336095>. Acesso em: 21 ago. 2025.

JACOMINE, P. K. T. et al. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado do Maranhão. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS/SUDENE-DRN, 1986. 2 v. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de pesquisa, 35; SUDENE-DRN. Recursos de solos, 17). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/336095>.

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

KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (org.). Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão: texto explicativo. Belém: CPRM, 2012. 150 p. Escala 1:750.000.

KÖPPEN, W. Das geographische system der klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (ed.). Handbuch der klimatologie. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. v. 1, pt. C. Disponível em: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf.

KUBIENA, W. L. Micromorphological features of soil geography. New Brunswick: Rutgers University Press, 1970. 254 p.

LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LOPES, A. da S. et al. Proposal of a revision scale of the degree of cohesion and tensile strength to aid in the diagnosis of the cohesive character in soils. *Catena*, v. 245, 2024. 108284.

LOPES, E. C. dos S.; TEIXEIRA, S. G. Contexto geológico. In: BANDEIRA, I. C. N. (org.). Geodiversidade do estado do Maranhão. Teresina: CPRM, 2013. p. 17-27. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/14761/livro_geodiversidade_MA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

MAFRA, A. L.; SILVA, E. F.; COOPER, M.; DEMATTE, J. L. I. Pedogênese de uma sequência de solos desenvolvidos de arenito na região de Piracicaba (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 2, p. 355-369, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200012>.

Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC). Sumário Executivo do Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão (ZEE-MA): meio físico. São Luís: IMESC, 2022. Disponível em: <http://zee.ma.gov.br/wp-content/uploads/2022/01/Sumario-Executivo-VOLUME-1.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. et al. Aplicação de técnicas de mapeamento digital de solos no âmbito do zoneamento ecológico-econômico do bioma Amazônia no Maranhão. *Embrapa Cocais. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, n. 3. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1129349>. Acesso em: 21 ago. 2025.

QUÉNARD, L. et al. Lessivage as a major process of soil formation: A revisitation of existing data. *Geoderma*, v. 167, p. 135-147, 2011.

PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; SILVA NETO, E. C.; PINHEIRO JUNIOR, C. R. Solos do Rio de Janeiro: Gênese, classificação e limitações ao uso agrícola. Ponta Grossa: Editora Atena, 2023. 231 p. DOI: 0.22533/at.ed.273232510.

PHILIPS, J. D. Geogenesis, pedogenesis, and multiple causality in the formation of texture-contrast soils. *Catena*, v. 58, n. 3, p. 275-295, 2004.

PHILIPS, J. D. Development of texture contrast soils by a combination of bioturbation and translocation. *Catena*, v. 70, n. 1, p. 92-104, 2007.

SANTOS, J. H. S.; SILVA, J. X. Datação e evolução dos campos de dunas eólicas inativas dos Lençóis Maranhenses. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa, MG. Resumos Expandidos. Viçosa, MG: [s. n.], 2009. v. 1, p. 1-17.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

SILVA, M. B.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. Á. de (ed.). Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. Brasília, DF: Embrapa, 2020.



SEÇÃO

2

**PEDOMETRIA APLICADA:
MAPEAMENTO DIGITAL E
SENSORIAMENTO REMOTO**



CAPÍTULO 8

MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS DO MARANHÃO: FUNDAMENTOS, BOAS PRÁTICAS E EXEMPLOS DE MAPEAMENTO DE CLASSES E ATRIBUTOS

Taciara Zborowski Horst

Professora - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Pesquisadora – EMBRAPA SOLOS

Jean Michel Moura-Bueno

Professor - Universidade de Cruz Alta

Alessandro Samuel-Rosa

Professor - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ana Caroline Pretto

Graduanda - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento de solos é uma ferramenta essencial para compreender a distribuição e as propriedades dos solos em uma região. Tradicionalmente, esse processo dependia da experiência do pedólogo, que utiliza observações de campo e a relação qualitativa solo-paisagem para delinear unidades de solo. Com o avanço das tecnologias, especialmente o sensoriamento remoto, os sistemas de informação geográfica (SIG) e as técnicas de modelagem matemática e estatística, o mapeamento digital de solos (MDS) emergiu como um método capaz de integrar grandes volumes de dados ambientais e pedológicos, gerando informações sobre os recursos do solo de forma mais precisa e em escalas antes inimagináveis. Essas inovações possibilitaram a criação de mapas, essenciais para o planejamento sustentável do uso da terra, a agricultura de precisão e a conservação ambiental. O trabalho de descrição dos perfis em campo e coleta das amostras para análises laboratoriais, continua sendo fundamental para treinar os modelos e representar o ambiente mapeado.

Neste capítulo, serão apresentadas as bases do MDS, seus fundamentos e sobre como os avanços tecnológicos e metodológicos transformaram a maneira como o solo é mapeado e como são explicitadas de forma quantitativa, as relações solo-paisagem. Será ainda apresentado e discutido o modelo SCORPAN (McBratney, Mendonça-Santos e Minasny, 2003) e sobre como ele pode ser utilizado para gerar informações de solo, tanto em termos de classes como de propriedades ou atributos dos solos, oferecendo uma visão abrangente de suas aplicações práticas. Os exemplos apresentados serão específicos para o Maranhão, uma região rica em diversidade ambiental e pedológica e de grande relevância para o estudo dos solos no Brasil. Serão explicitados os métodos utilizados na aplicação do modelo SCORPAN, desde o processamento dos dados iniciais até a modelagem e geração de mapas digitais. Além disso, serão demonstrados os produtos que podem ser gerados a partir desse método, como de propriedades específicas do solo e análises de distribuição espacial dos solos na paisagem.

Ao final deste capítulo, espera-se que os leitores tenham uma compreensão clara de como o MDS com base no modelo SCORPAN pode ser aplicado para transformar dados pontuais de solo em informações espacialmente explícitas de classes e atributos/propriedades dos solos para diversas finalidades, desde a agricultura até a gestão ambiental.

2. MAPEAMENTO DE SOLOS

O mapeamento de solos tem suas raízes na relação entre os solos e a paisagem, conceito que emergiu com os trabalhos de Dokuchaev, considerado o pai da Pedologia, em sua obra *Russian Chernozem* (1883). Essa abordagem foi expandida por outros cientistas do mundo ocidental, por Hans Jenny, que sistematizou os fatores de formação do solo em sua obra clássica *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology* (1941). A partir de observações de campo nos Estados Unidos, Jenny propôs o modelo CLORPT, um acrônimo para Climate (C), Organisms (O), Relief (R), Parent material (P), Time (T), representado pela equação:

$$\text{Solo} = f(\text{C}, \text{O}, \text{R}, \text{P}, \text{T}, \dots)$$

Esse modelo estabelece que a formação e distribuição dos solos são condicionadas por fatores ambientais que interagem entre si ao longo do tempo. Jenny deixou a equação em aberto (reticências) para permitir a inclusão de novos fatores, reconhecendo a complexidade e variabilidade dos ambientes pedológicos.

A abordagem tradicional de mapeamento de solos baseia-se nesse modelo teórico e na experiência prática do pedólogo. O profissional analisa propriedades morfológicas do solo em campo – como cor, textura, estrutura e profundidade – e

as relaciona com elementos da paisagem, como relevo, vegetação e uso da terra. A partir dessas correlações, são delimitadas unidades de solo em mapas, mesmo em áreas não diretamente amostradas. Por exemplo, em regiões declivosas, a observação recorrente de solos rasos - Neossolos Litólicos com menos de 50 cm de profundidade – leva o pedólogo a associá-los a áreas com elevada declividade. Ao verificar essa relação em múltiplos pontos, o pedólogo projeta sua ocorrência para áreas similares usando dados topográficos, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), e delinea mapas de distribuição da classe com base nessa inferência. Esse método é fortemente dependente da capacidade do pedólogo em interpretar a paisagem e integrar conhecimento empírico aos fatores de formação. O processo decisório, desde a escolha dos pontos de amostragem até o delineamento de unidades de solo, é guiado por um julgamento técnico sem um modelo formal explicitamente definido. Por isso, o mapeamento tradicional é considerado uma prática interpretativa.

O avanço das tecnologias, como o sensoriamento remoto, os SIG e a crescente disponibilidade de dados ambientais em alta resolução, trouxe uma nova perspectiva ao estudo do solo. Essas ferramentas possibilitam representar os fatores de formação de forma contínua e quantitativa, ampliando a capacidade de análise e inferência espacial.

Foi nesse contexto que surgiu o MDS, consolidado pelo modelo SCORPAN, proposto por McBratney, Mendonça-Santos e Minasny (2003). Esse modelo expande o CLORPT ao incorporar a posição espacial (n) e o próprio solo (s) como variáveis preditoras, formando o acrônimo SCORPAN: solo - Soil (s), clima - Climate (c), organismos - Organisms (o), relevo - Relief (r), material parental - Parent material (p), idade - Age (a), e a posição espacial - Spatial position (n). Assim, o solo passa a ser descrito como função desses fatores e suas proxies digitais:

$$\textit{Solo} = f(S, C, O, R, P, A, N)$$

Com isso, é possível modelar a distribuição de classes ou atributos do solo com base em algoritmos matemáticos e estatísticos, integrando grandes volumes de dados ambientais. O modelo SCORPAN tornou-se a base conceitual do MDS, permitindo a geração de mapas com maior precisão, escalabilidade e reprodutibilidade (Figura 1).

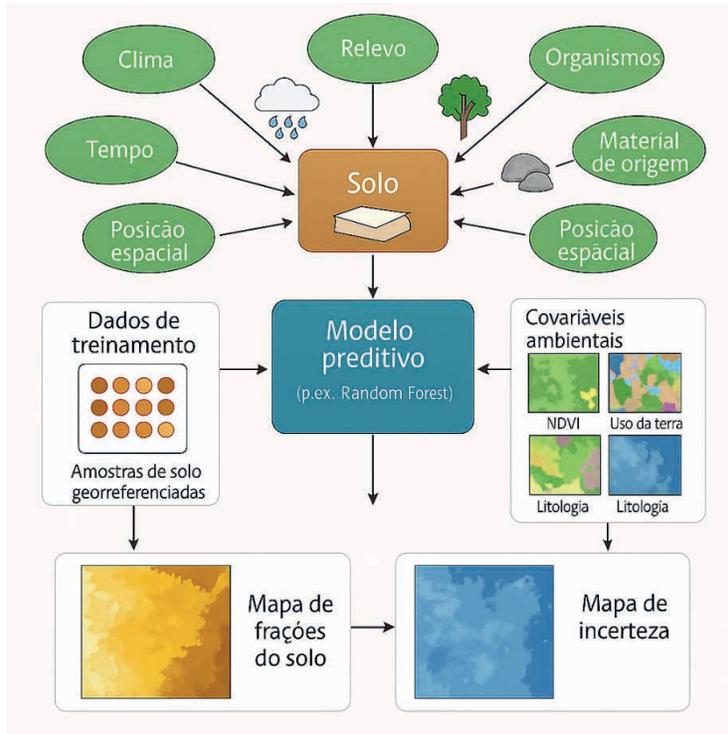


Figura 1. Fluxograma da modelagem preditiva do MDS.

2.1. Fundamentos e Bases Conceituais do Mapeamento Digital de Solos

O MDS foi definido por Lagacherie et al. (2006) como “a criação e inserção de dados em sistemas de informação espacial de solos por meio de modelos numéricos, para inferir as variações espaciais e temporais de classes de solos e de suas propriedades, a partir de observações, conhecimento pedológico e variáveis ambientais relacionadas”. Essa abordagem produz mapas digitais contínuos de classes ou atributos do solo (como o teor de argila ou classe taxonômica, por exemplo), acompanhados de suas respectivas incertezas. Esses produtos são trabalhados em ambientes digitais, como SIG, permitindo análises integradas de dados em diferentes escalas e formatos. Assim, o MDS tornou-se uma ferramenta estratégica para o planejamento territorial, a agricultura de precisão, o monitoramento ambiental e a formulação de políticas públicas.

O raciocínio do MDS mantém o fundamento da relação solo-paisagem, formalizada inicialmente por Jenny (1941), com base nos fatores de formação descritos por Dokuchaev em 1883. No entanto, o avanço das tecnologias possibilitou

a evolução dessa formulação quantitativa para um modelo que integra a localização espacial através das coordenadas geográficas e permite a inclusão de outras variáveis ambientais que atuam na formação dos solos, inclusive, outras informações sobre os solos (McBratney, Mendonça-Santos e Minasny, 2003). No modelo SCORPAN, cada fator é representado por um conjunto de covariáveis ambientais, que podem ser contínuas (como elevação ou índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI) ou categóricas (como classes de uso da terra ou litologia). Essas covariáveis são derivadas de diferentes fontes de dados, como MDE, imagens de satélite, mapas geológicos, dados climáticos interpolados ou informações de uso e cobertura do solo.

O termo “covariável” é utilizado porque essas variáveis explicativas covariam com a variável de interesse (alvo), ou seja, variam espacialmente de forma relacionada às mudanças observadas nas propriedades ou classes de solo. Por exemplo, a declividade (derivada de um MDE) pode aumentar à medida que a profundidade do solo diminui em uma determinada paisagem, evidenciando uma relação funcional entre relevo e desenvolvimento do solo. Essas covariáveis representam proxies quantificáveis dos fatores de formação do solo e permitem explicitamente modelar como o ambiente muda e influencia a pedogênese. Ao integrar essas informações em algoritmos de modelagem preditiva, o MDS permite a predição de atributos ou classes de solo em locais não amostrados, com base na variação espacial dessas covariáveis ambientais e nos dados de solos usados para treinar os modelos.

Em contraste com o mapeamento tradicional, que depende do julgamento do pedólogo, o MDS utiliza modelos matemáticos e estatísticos para combinar observações pontuais com essas covariáveis ambientais e gerar mapas digitais. Entre os algoritmos amplamente utilizados destacam-se técnicas de regressão, como a regressão múltipla, a regressão logística e outras e métodos de aprendizado de máquina, como o Random Forest, especialmente eficaz em contextos com múltiplos preditores e relações não lineares.

A transição conceitual e metodológica entre o mapeamento tradicional e o digital pode ser ilustrada pelo mesmo exemplo dos Neossolos Litólicos, apresentado no item anterior. No modelo tradicional, a associação entre solos rasos e áreas de elevada declividade é construída a partir da experiência de campo do pedólogo, que observa padrões recorrentes e projeta essa relação sobre áreas adjacentes (Figura 2A). No MDS, essa inferência é formalizada por meio de modelos numéricos que permitem quantificar e validar essas relações (Figura 2B). Por exemplo, em uma análise exploratória realizada em área declivosa com presença de Neossolos Litólicos, observou-se uma correlação negativa significativa ($r = -0,74$) entre a profundidade do solo e a declividade do terreno (Horst, 2017). Isso indica que, à medida que a declividade aumenta, a profundidade dos perfis tende a diminuir — uma evidência numérica da relação pedológica observada qualitativamente no campo.

A partir dessa relação, algoritmos de regressão ou modelos de aprendizado de máquina podem ser treinados para prever a probabilidade de ocorrência de solos rasos com base em dados contínuos de declividade. O resultado é um mapa digital que representa, em escala contínua, a distribuição potencial de Neossolos Litólicos em toda a paisagem — mesmo em áreas não amostradas.

Além disso, ao incluir outras covariáveis relevantes, como material de origem, índices de vegetação ou uso da terra, o modelo ganha robustez e capacidade de captar padrões complexos de formação do solo. Isso ilustra o principal diferencial do MDS: a transformação de relações qualitativas em funções matemáticas especializadas, aplicáveis em grandes áreas e com controle explícito sobre a incerteza.

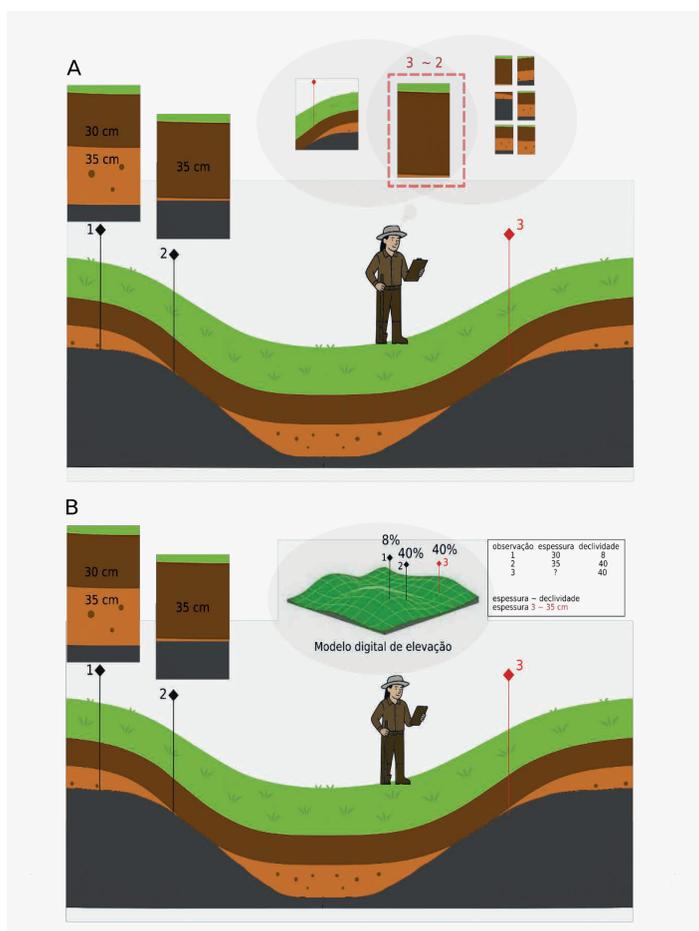


Figura 2. Comparação entre o raciocínio inferencial (qualitativo) no mapeamento tradicional (A), baseado na interpretação visual e extrapolação entre observações, e no mapeamento digital de solos (B), baseado na modelagem de relações quantitativas entre atributos do solo e variáveis ambientais como declividade.

Os primórdios do MDS, com base no modelo SCORPAN, foram estabelecidos pela publicação de McBratney, Mendonça-Santos e Minasny (2003), a qual descreveu as bases para o MDS no mundo. O primeiro Workshop global em MDS foi realizado em Montpellier, na França em 2004, resultando no livro “Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective”, publicado em 2007 (Lagacherie, McBratney e Voltz, 2007) e trazendo toda a base de trabalhos em MDS no mundo, incluindo um capítulo sobre a situação do MDS no Brasil “The state of the art of Brazilian Soil Mapping and prospects for Digital Soil Mapping” (Mendonça-Santos e Santos, 2007).

No Brasil, os primeiros trabalhos aplicados em MDS datam do início dos anos 2000, com destaque para as publicações do “2nd Global Workshop Digital Soil Mapping”, realizado no Rio de Janeiro em 2006, culminando com a publicação dos trabalhos no livro intitulado “Digital Soil Mapping with Limited Data” (Hartemink, McBratney e Mendonça-Santos, 2008). Destaque para o trabalho de mapeamento de classes de solos do Rio de Janeiro, por Mendonça-Santos et al., (2006), no Rio de Janeiro. Nesse mesmo ano, Giasson et al. (2006), usaram o MDS para mapear os solos do Rio Grande do Sul, e depois muitos outros trabalhos seguindo estes protocolos foram realizados podendo ser citados (Ten Caten, 2012; Moura-Bueno et al., 2019; Samuel-Rosa et al., 2019).

Para atributos, como o estoque de carbono orgânico, destaca-se o trabalho de Mendonça-Santos et al. (2007), seguido por outras iniciativas nacionais com destaque para o mapa de carbono do solo até 2 m de profundidade, elaborado por Vasques et al. (2017) para compor o Mapa Global de Carbono Orgânico do Solo da FAO. No ano 2000, com o advento do MDS, foi criada a Rede Brasileira de Mapeamento Digital de Solos, por meio de um projeto financiado pelo CNPq, que permitiu os encontros, discussões e avanços em MDS e a cooperação entre membros da rede, bem como a consolidação no tema MDS no Brasil.

Cancian et al. (2018), ao conduzirem uma análise bibliométrica da produção científica em MDS entre 1996 e 2017, constataram o crescimento expressivo das publicações e o destaque crescente da pesquisa brasileira no cenário internacional, identificando aproximadamente 200 pesquisadores atuando com MDS no Brasil. Apesar desses avanços, uma revisão sistemática de 334 artigos de MDS conduzida por Coelho et al. (2021) revelou que, até a publicação de Mendonça-Santos et al. (2020), não havia trabalhos registrados com aplicação de MDS no estado do Maranhão, reforçando a relevância de novas iniciativas nesta região.

Atualmente, o Brasil avança com o Programa Nacional de Solos (PronaSolos), que visa mapear todo o território nacional em escalas de 1:25.000 a 1:100.000, que se tornou uma política pública coordenada pelo MAPA (Ministério da Agricultura e Pecuária) (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/>

pronasolos), cuja plataforma com mapas e informações de solos do Brasil pode ser acessada em : <https://www.embrapa.br/pronasolos> e <https://pronasolos.sgb.gov.br/>. Nesse contexto, o MDS desponta como ferramenta indispensável para otimizar recursos, direcionar o planejamento amostral e ampliar a cobertura espacial dos levantamentos. O recente lançamento do Repositório de Dados de Solo (SoilData) (Samuel-Rosa et al., 2018) e estudos como os de Stumpf et al. (2016) e Hendriks et al. (2019) reforçam o papel estratégico do uso de dados legados no suporte à modelagem digital.

Nesse contexto, destaca-se a iniciativa MapBiomas Solo, que representa um avanço metodológico e institucional na consolidação do MDS em larga escala no Brasil. A partir da integração entre dados legados harmonizados — como aqueles disponíveis no SoilData —, imagens de sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina, o projeto viabiliza a geração de séries temporais de mapas de atributos do solo, com periodicidade anual e cobertura nacional (MAPBIOMAS, 2023). Essa abordagem espaço-temporal permite não apenas a análise estática das propriedades do solo, mas também o monitoramento de sua dinâmica ao longo do tempo, contribuindo para diagnósticos ambientais, gestão territorial e formulação de políticas públicas.

2.2. Componentes Operacionais do Mapeamento Digital de Solos

A aplicação do MDS envolve a integração entre dados observados em campo e técnicas de modelagem espacial. Operacionalmente, o MDS depende de três componentes fundamentais:

- Dados de treinamento: conjunto de amostras georreferenciadas com a variável-alvo (por exemplo, frações granulométricas, pH, classe de solo...), obtidas por amostragem de campo e análises laboratoriais;
- Modelo preditivo: algoritmo matemático ou estatístico que aprende os padrões espaciais da variável-alvo com base na correlação entre os dados amostrados ou covariáveis ambientais (fatores do modelo SCORPAN);
- Avaliação e validação: etapa que permite quantificar o desempenho do modelo, com métricas apropriadas conforme o tipo de variável (contínua ou categórica), além de gerar estimativas da incerteza associada à predição.

Essa estrutura torna o modelo explícito, reproduzível e passível de validação numérica, permitindo não apenas a geração de mapas, mas também a quantificação da confiança nas estimativas (mapa de erros ou incertezas do modelo). A natureza da variável-alvo — se contínua ou categórica —, define os métodos utilizados, tanto para a modelagem quanto para a avaliação e expressão da incerteza.

- Dados de treinamento

Os dados de treinamento correspondem ao conjunto de amostras de solo georreferenciadas que contêm a variável-alvo a ser modelada. Essa variável pode representar qualquer propriedade do solo (como teor de areia, silte, argila, carbono orgânico, pH, profundidade...) ou mesmo uma função do solo (como capacidade de retenção de água ou aptidão agrícola), desde que esteja relacionada aos fatores da paisagem — conforme o princípio da relação solo-paisagem que fundamenta o modelo SCORPAN.

As amostras podem ser coletadas especificamente para a finalidade de modelagem (atividade-fim), ou podem ser provenientes de reuso de dados legados, ou seja, coletados originalmente para outras finalidades. Ambas as abordagens são válidas, desde que os dados sejam confiáveis, bem documentados e compatíveis com os objetivos da modelagem.

A qualidade, variabilidade e distribuição espacial dos dados de solo têm influência direta sobre a robustez do modelo. Não há um número fixo ou mínimo universal de amostras: o mais importante é que o conjunto amostral representa adequadamente a complexidade ambiental da área de estudo. Em geral, quanto maior o número de amostras bem distribuídas na paisagem, maior é a chance de capturar os principais gradientes ambientais, o que favorece a generalização e reduz a incerteza das predições. Em ambientes altamente heterogêneos, essa representatividade torna-se ainda mais crítica para evitar extrapolações indevidas e interpretações incorretas.

Por fim, é fundamental compreender a natureza da variável-alvo — se contínua, categórica, derivada ou composta —, assim como o tipo e a quantidade de dados disponíveis. Essas informações guiam a escolha do algoritmo de modelagem mais adequado, influenciando desde a estrutura dos dados de entrada até as estratégias de validação e expressão da incerteza.

- Modelo preditivo

O modelo preditivo é o mecanismo matemático/estatístico ou computacional que estabelece a relação entre os dados de solo (variável-alvo) e os fatores ambientais representados por covariáveis. Ele é a peça central do MDS, pois transforma observações pontuais em inferências espaciais sobre toda a área de interesse. Existem dois grandes grupos de abordagens: modelos geoestatísticos e modelos baseados em covariáveis ambientais.

Modelos baseados em geoestatística exploram a autocorrelação espacial entre pontos amostrados, assumindo que locais próximos tendem a apresentar características similares. Técnicas como krigagem ordinária, cokrigagem ou krigagem com regressão externa são aplicadas principalmente para variáveis contínuas,

oferecendo não apenas a predição, mas também a variância da estimativa como medida de incerteza. Essas abordagens são mais indicadas quando a densidade amostral é razoável e a estrutura espacial pode ser modelada com semivariogramas confiáveis.

Modelos baseados em covariáveis ambientais: utilizam variáveis derivadas dos fatores do modelo SCORPAN (solo, clima, organismos, relevo, material parental, tempo e posição espacial) como proxies digitais da paisagem. Essas covariáveis podem ser contínuas, como declividade, NDVI, altitude, precipitação média, entre outras; ou categóricas, como uso da terra, tipo de vegetação, classes geológicas ou litológicas.

É essencial que as covariáveis selecionadas possuam relação causa-efeito plausível com a variável-alvo, ou seja, que façam sentido à luz dos processos de formação e distribuição dos solos. Essa relação pode ser linear ou não linear, o que influencia diretamente a escolha do algoritmo mais apropriado.

Diversos algoritmos de modelagem estão disponíveis para capturar essas relações, entre eles:

Modelos lineares: como regressão linear múltipla, indicados para relações diretas e conjuntos de dados com número limitado de variáveis;

Árvores de decisão e regressão: como Random Forest e Gradient Boosting, que lidam bem com grandes conjuntos de dados e relações complexas;

Máquinas de vetores de suporte (SVM): eficazes em cenários com alta dimensionalidade e separações não lineares;

Redes neurais artificiais: úteis para modelagens mais sofisticadas, ainda que exigentes em calibração e volume de dados.

Esses modelos podem ser utilizados de forma individual ou em conjunto (ensemble), combinando diferentes algoritmos para melhorar o desempenho geral. Um exemplo clássico é o próprio Random Forest, que opera como um conjunto de árvores de decisão, integrando múltiplas predições para gerar um resultado mais estável e preciso.

Alguns modelos têm desempenho superior com grandes volumes de dados (como Random Forest e SVM), enquanto outros, como a regressão linear, podem ser mais adequados em situações com menor número de variáveis ou menor complexidade de relacionamentos.

Em modelagens verticais (por camadas), é comum aplicar predição sequencial, utilizando os valores preditos da camada mais superficial (por exemplo, 0–10 cm) como covariável adicional para a predição da camada seguinte (10–20 cm), e assim por diante. Essa abordagem encadeada busca preservar a coerência vertical do perfil

do solo, o que é especialmente importante para atributos como granulometria, carbono orgânico ou umidade, cuja distribuição ao longo da profundidade depende fortemente das camadas superiores.

Além da dimensão vertical, o MDS pode incorporar também a dimensão temporal, permitindo a modelagem espaço-temporal de atributos do solo. Para isso, são utilizados dados de solo e covariáveis com referência temporal (ex.: séries históricas de NDVI, precipitação, uso da terra), bem como mapas anteriores da variável-alvo, que podem ser incluídos como preditores para anos subsequentes. Essa abordagem possibilita analisar e prever mudanças nos atributos do solo ao longo do tempo, desde que haja dados suficientes para representar essas variações. A predição espaço-temporal depende, portanto, da mudança das covariáveis ao longo do tempo, sendo uma estratégia poderosa para estudos de dinâmica do solo sob diferentes cenários de uso da terra, clima e manejo.

- Avaliação das estimativas

A avaliação das estimativas produzidas por um modelo de MDS é indispensável para garantir sua confiabilidade e utilidade prática. Essa avaliação é realizada por meio da validação, que consiste na comparação entre os valores observados e medidos (dados de campo ou laboratório) e os valores preditos pelo modelo. A partir dessa comparação, obtêm-se métricas quantitativas que descrevem a qualidade das predições em termos de acurácia, precisão, tendência e consistência. As métricas utilizadas variam, conforme a natureza da variável-alvo, se contínua ou categórica.

Para variáveis contínuas, como teores de argila, profundidade do solo ou teor de carbono orgânico, comumente se utiliza o ME (erro médio, que revela a existência de tendência sistemática nas predições), o MAE (erro absoluto médio), o MSE é raiz quadrada no RMSE; RMSE (erro quadrático médio), o MEC (que indica a proporção da variância explicada pelo modelo). Além disso, é possível calcular o slope é o coeficiente de declividade do modelo de regressão entre os valores observados e os valores preditos. O resultado é o segundo coeficiente retornado pela função lm, que realiza a regressão linear. As métricas são calculadas pelas seguintes equações:

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - x_i}{n} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (2)$$

$$MSE = \frac{(y_i - x_i)^2}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MEC = 1 - \frac{MSE}{\frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

em que:

y_i é o valor predito;

x_i é o valor observado;

n é o número de observações;

\bar{x}_i é a média dos valores observados;

ME é calculado através da média dos erros;

MAE é o erro calculado a partir da média dos erros absolutos;

MSE é o erro calculado a partir da média dos erros elevado ao quadrado;

RMSE é o erro calculado através da raiz quadrada do mse;

NSE considera a eficiência do modelo, sendo uma medida de ajuste do modelo em relação a variabilidade dos dados observados. É calculado como 1 menos a razão entre o MSE e a média dos resíduos elevado ao quadrado;

Já para variáveis categóricas, como classes texturais ou classes taxonômicas de solo, utilizam-se métricas derivadas da matriz de confusão, como a acurácia global (AG), a precisão do usuário (AU), relacionada ao erro de comissão. Em MDS a AU considera a proporção de cada classe predita que concorda com os dados de referência, ou seja, representa a acurácia individual de predição de cada classe.

$$AG = N \sum_{j=1}^k n_{ii} / k \quad (6)$$

$$UA_i = n_{ii} / n + i \quad (7)$$

em que:

n_{ii} é o número de acertos na classe i ,

$n + i$ é o total de amostras preditas na classe i ,

N é o total geral de amostras,

k é o número de classes,

A forma como os dados são utilizados na validação influencia a interpretação das métricas obtidas. A validação externa, também chamada de holdout, é considerada a abordagem mais rigorosa. Nela, o modelo é testado com um conjunto de dados completamente independente, que não foi utilizado em nenhuma etapa do treinamento. Esse conjunto idealmente deve ter sido obtido por amostragem probabilística, de modo a representar fielmente a variabilidade da paisagem e permitir avaliar a capacidade do modelo de generalizar para novos locais. No entanto, essa abordagem exige um volume suficiente de dados, para que parte deles possa ser reservada exclusivamente para o teste.

Quando não é possível dispor de dados independentes, aplica-se a validação cruzada (cross-validation), na qual o mesmo conjunto de dados é subdividido em partes e utilizado alternadamente para treino e teste. Essa técnica permite maximizar o uso de conjuntos de dados limitados, sendo especialmente útil quando há poucas observações ou quando os dados são especialmente dependentes. No entanto, por envolver algum grau de sobreposição entre os dados utilizados para treinar e para testar o modelo, a validação cruzada tende a fornecer estimativas de desempenho ligeiramente mais otimistas, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Além da avaliação por métricas de erro, um componente fundamental da modelagem preditiva é a incerteza associada às estimativas. Diferentemente do erro — que depende da existência de observações para comparação direta — a incerteza é uma propriedade interna do modelo, relacionada ao grau de confiança nas predições feitas em cada ponto da área mapeada. A incerteza representa, portanto, a variabilidade esperada das estimativas, considerando a estrutura dos dados, a densidade amostral, a adequação das covariáveis e a complexidade do ambiente modelado.

Para variáveis contínuas, a incerteza pode ser expressa por meio do desvio padrão da predição, intervalos de confiança (por exemplo, 90%) ou quantis de predição (como P5, P50, P95), que indicam a dispersão dos valores possíveis para cada pixel. Já para variáveis categóricas, a incerteza é representada geralmente pela probabilidade de ocorrência de cada classe (por exemplo, 70% de chance de uma área pertencer a uma determinada classe textural ou classe de solo), ou por medidas de entropia, como o índice de confusão (IC), que indicam o grau de indecisão do modelo em cada local (Burrough et al., 1997). O IC pode ser caracterizado por valores de probabilidade produzidos como um subproduto da classificação preditiva. O IC traz uma medida da confusão que o modelo preditivo faz entre as duas classes de solo mais prováveis. O IC varia entre 0 e 1, onde 1 significa máxima confusão (mínima precisão) e 0 a mínima confusão (máxima precisão).

$$IP = \text{percentil } 90 - \text{percentil } 10 \quad (6)$$

$$IC = 1 - (\mu_{\max i} - \mu_{(\max - 1)i}) \quad (7)$$

em que:

$\mu_{\max i}$ = valor de associação da classe i com a máxima probabilidade de ocorrência (μ_k) no pixel i ,

$\mu_{(\max - 1)i}$ = segundo maior valor de associação no mesmo pixel i ,

μ_k = valor de probabilidade da classe i atribuído em k classes.

A comunicação clara da incerteza é fundamental para o uso ético e eficiente dos produtos do MDS. Ela permite ao usuário avaliar a robustez local das predições, identificar regiões com maior ou menor confiabilidade e, quando necessário, planejar novas coletas de dados para reduzir a incerteza nas áreas mais críticas. Assim, a incerteza é não apenas uma limitação, mas também uma ferramenta estratégica de interpretação e tomada de decisão, sendo indispensável em qualquer aplicação prática de mapas digitais de solo.

3. APLICAÇÃO DE MDS NO MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DOS SOLOS DO MARANHÃO

Neste item, será apresentado um exercício prático de mapeamento digital da granulometria dos solos do Estado do Maranhão, com foco na predição das frações areia, silte e argila, propriedades físicas fundamentais para o entendimento do funcionamento e uso do solo. A atividade é estruturada para apresentar, de forma sequencial, os componentes operacionais do MDS — dados de treinamento, modelo preditivo, validação e geração de mapas, conforme apresentado neste capítulo — e acompanha um código em Google Earth Engine (GEE) que permite a reprodução completa do processo.

Serão introduzidas as definições básicas de granulometria e de cada etapa envolvida na modelagem. Será utilizado o algoritmo Random Forest para gerar mapas contínuos das frações texturais nas camadas de 0–30 cm, com resolução espacial de 30 metros. As predições são feitas com base em covariáveis ambientais representativas dos fatores de formação do solo, e o fluxo será exemplificado passo a passo no GEE, permitindo que o leitor compreenda e aplique o MDS com base em princípios conceituais sólidos e ferramentas acessíveis.

Para orientações detalhadas sobre como acessar e utilizar os dados e scripts necessários para reproduzir este exercício, consulte o item “Acesso aos dados” apresentado ao final deste capítulo.

3.1. Dados de treinamento

A base de dados utilizada para o exercício de modelagem corresponde a uma coleção de amostras de solo georreferenciadas, compilada, harmonizada e armazenada sob o nome “matriz_psd_maranhao_v3”, acessível via asset no GEE. Essa base representa um subconjunto do repositório SoilData, ajustado para a área do Maranhão, contendo informações laboratoriais das frações granulométricas para 489 amostras (Figura 3), na profundidade de 0–30 cm.

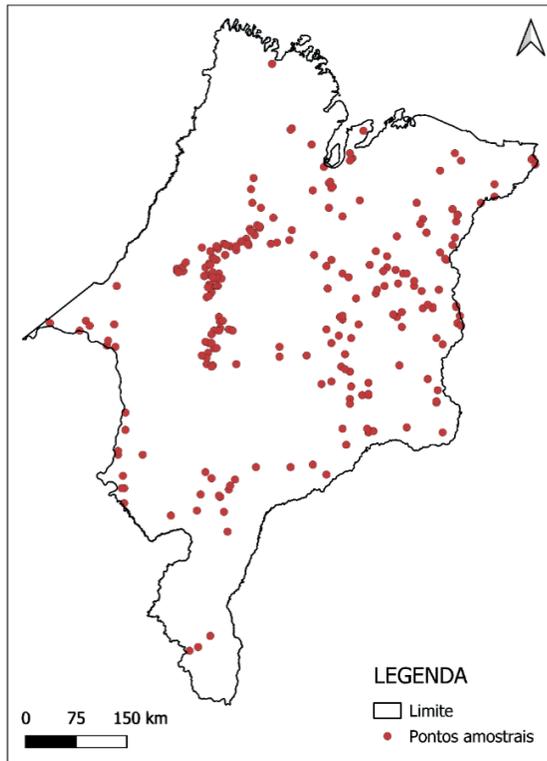


Figura 3. Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados como dados de treinamento no mapeamento da granulometria do estado do Maranhão (n = 489).

A variável-alvo do exercício é a granulometria do solo, definida pelas frações de:

- Areia (sand): partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 0,05 mm;
- Silte (silt): partículas entre 0,05 mm e 0,002 mm;
- Argila (clay): partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm.

Essas três frações compõem, em conjunto, 100% da massa mineral do solo e, por isso, constituem dados composicionais — isto é, interdependentes. Para evitar redundâncias estatísticas e garantir validade na modelagem, os valores foram transformados em razão logarítmica (Aitchison, 1982; Samuel-Rosa, 2012), utilizando as seguintes variáveis derivadas:

- \log_clay_sand : logaritmo da razão entre argila e areia.
- \log_silt_sand : logaritmo da razão entre silte e areia;

Essas variáveis derivadas são oriundas de um pré-processamento pela implementação da transformação log-ratio aditiva (ALR), sendo iniciado com a escolha de um denominador comum entre as frações texturais do solo. Neste estudo, a fração areia foi selecionada como referência para a transformação. Em seguida, são calculadas duas razões para cada amostra de terra: a razão entre argila e areia, e entre silte e areia. A essas razões aplica-se o logaritmo natural, resultando nos componentes ALR1 e ALR2, conforme a equação:

$$ALR1 = \ln \frac{Argila}{Areia}$$

$$ALR2 = \ln \frac{Silte}{Areia}$$

Assim, ALR1 e ALR2 passam a ser utilizadas como variáveis-alvo em modelos preditivos, cada um ajustado para predição separadamente ALR1 e ALR2. Os resultados da modelagem geram dois mapas intermediários: um para ALR1 e outro para ALR2. Para interpretar os resultados em termos de proporções originais de areia, silte e argila, é necessário reverter a transformação ALR. Onde, a primeira etapa consiste na exponenciação dos valores preditos convertendo ALR1 e ALR2 de volta às razões originais:

$$Seja R_1 = e^{ALR1} \quad e R_2 = e^{ALR2}$$

Então,

$$Areia = \frac{1}{R_1 + R_2 + 1} \times 100$$

$$Silte = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + 1} \times 100$$

$$Argila = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + 1} \times 100$$

A seguir, é apresentado um exemplo da aplicação de dados composicionais em uma amostra de solo com porcentagens de 50% (500 g/kg) de argila, 30% (300 g/kg) de silte e 20% (200 g/kg) de areia. Primeiramente, calcula-se o logaritmo natural das razões das frações texturais em relação à areia:

$$ALR1 = \ln \frac{0,50}{0,20} = \ln(2,5) \approx 0,9163$$

$$ALR2 = \ln \frac{0,30}{0,20} = \ln(1,5) \approx 0,4055$$

Por meio da função exponencial os valores preditos serão convertidos de ALR1 e ALR2 para as razões originais, valores para os três mapas (percentagem de areia, silte e argila).

$$\text{onde, } R_1 = e^{0,9163} \approx 2,5$$

$$R_2 = e^{0,4055} \approx 1,5$$

Então,

$$\text{Areia} = \frac{1}{2,5 + 1,5 + 1} \times 100 = 20\%$$

$$\text{Silte} = \frac{1,5}{2,5 + 1,5 + 1} \times 100 = 30\%$$

$$\text{Argila} = \frac{2,5}{2,5 + 1,5 + 1} \times 100 = 50\%$$

Essa transformação é uma prática recomendada em modelagem de dados composicionais, pois elimina a restrição da soma constante e permite o uso de algoritmos tradicionais de regressão e classificação. Os dados de entrada foram filtrados para garantir consistência mínima, removendo registros com valores nulos ou fora do intervalo lógico, e os identificadores únicos (id) e índices foram preservados para fins de rastreabilidade.

3.2. Modelo preditivo

Para a predição das frações granulométricas dos solos do estado do Maranhão, foi adotado o algoritmo Random Forest, uma técnica de aprendizado de máquina baseada em um conjunto de árvores de decisão. O modelo foi escolhido por sua capacidade de lidar com conjuntos de dados complexos, com múltiplas covariáveis e

relações não lineares, além de sua robustez frente a dados ruidosos e sua flexibilidade para modelar variáveis contínuas. Ele captura a relação entre os dados pontuais e as covariáveis ambientais.

- Covariáveis Ambientais do modelo SCORPAN

O desempenho do modelo preditivo depende fortemente da escolha das covariáveis ambientais, que devem representar proxies digitais plausíveis dos fatores de formação do solo. Abaixo, são descritas as covariáveis utilizadas no modelo SCORPAN, sua natureza (contínua ou categórica), sua origem e a relação pedologicamente esperada com a granulometria, que está sendo aqui exemplificada:

- Covariáveis topográficas (fator R – relevo)

Elevação (elevation) – (Yamazaki et al., 2017) variável contínua, Modelo Digital de Elevação (MDE); relação com a litologia, influencia os processos de erosão, deposição e estabilidade dos solos. Solos em áreas mais elevadas tendem a ser mais erodidos, mais rasos. Dependendo do material de origem, com maior proporção de areia.

Declividade (slope) – (Amatulli et al., 2020, 2018) variável contínua: reflete o grau de inclinação do terreno. Áreas mais inclinadas tendem a apresentar menor acúmulo de material fino (silte e argila), favorecendo a ocorrência de solos rasos e arenosos.

Índice de posição topográfica (TPI) – (Amatulli et al., 2020, 2018): variável contínua: indica se um ponto está em crista, encosta ou vale. Vales favorecem deposição e acúmulo de materiais finos.

Curvatura do relevo (curvature) – (Amatulli et al., 2020, 2018): variável contínua: identifica zonas de concavidade/convexidade que influenciam a concentração de água e sedimentos, o que afeta a distribuição textural.

Rugosidade do relevo (roughness) – (Amatulli et al., 2020, 2018): variável contínua: indica a variação da elevação em uma vizinhança, refletindo a complexidade da superfície. Superfícies mais rugosas tendem a ter maior variabilidade nos processos de erosão, infiltração e deposição, afetando a redistribuição de partículas do solo.

Índice de convergência do relevo (convergence) – (Amatulli et al., 2020, 2018): variável contínua: representa a tendência de convergência ou divergência do fluxo superficial da água. Regiões com valores positivos favorecem o acúmulo de água e sedimentos (vales), enquanto valores negativos indicam áreas de escoamento (cristas e encostas), influenciando diretamente a distribuição textural do solo.

Índice de potência do fluxo (SPI – Stream Power Index) – (Amatulli et al., 2020, 2018): variável contínua: relaciona declividade e área de contribuição, estimando o poder erosivo do fluxo superficial. Áreas com SPI elevado tendem a apresentar maior remoção de partículas finas, influenciando negativamente no acúmulo de silte e argila.

- Covariáveis espectrais e vegetação (fatores O – organismos e N – localização)

Biomias brasileiros – (IBGE, 2019b): variável categórica, identifica os biomas oficiais do Brasil (ex: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica), que estão associados a diferentes regimes climáticos, tipos de vegetação e uso da terra, influenciando indiretamente a formação e distribuição dos solos.

Fitofisionomias – (IBGE, 2023, 2012): variável categórica, descreve a fisionomia da vegetação (ex: floresta estacional, savana, campo limpo), sendo um indicador da cobertura vegetal potencial e histórica, que pode refletir o grau de intemperismo e o estágio de desenvolvimento do solo.

Índices minerais espectrais – (Landsat 5, 7, and 8): variável contínua, derivados de imagens Landsat, são índices espectrais desenvolvidos para detectar a presença relativa de minerais específicos na superfície do solo.

Minerais de argila (clay minerals) - (Landsat 5, 7, and 8): relacionado à presença de minerais de argila na superfície do solo, geralmente associados a maior intemperismo e acúmulo de partículas finas.

Óxidos de ferro (oxides) - (Landsat 5, 7, and 8): indica concentração superficial de óxidos (ex: hematita, goethita), que estão relacionados à coloração, drenagem e grau de intemperismo do solo.

- Covariáveis geológicas e pedológicas (fator P – material de origem)

Classe litológica (Províncias geológicas) – (IBGE, 2019): variável categórica proveniente de mapeamentos geológicos, que identifica o tipo de rocha ou sedimento que deu origem ao solo. Rochas ou materiais mais intemperizados, como os arenitos, tendem a originar solos arenosos. Já rochas máficas (como basaltos) ou sedimentos argilosos geralmente formam solos de textura mais fina, como os argilosos.

Mapas de solos pré-existent (World Reference Base for Soil Resources) – (Hengl et al., 2017): variável categórica: pode ser utilizado como covariável proxy do fator "s", fornecendo conhecimento prévio incorporado ao modelo.

Black Soils (Probabilidade de ocorrência) – (FAO, 2022): variável categórica: representa áreas com maior chance de ocorrência de solos escuros e ricos em matéria orgânica.

- Covariáveis climáticas (fator C – clima)

Classificação climática de Köppen – (Alvares et al., 2013) variável categórica: sistema climático que classifica regiões com base em temperatura e precipitação ao longo do ano. No código, são utilizadas três resoluções: Köppen L1: classes principais (ex: Af, Cfb, Aw); Köppen L2 e L3: subcategorias mais detalhadas. Essa variável é útil para capturar os efeitos do clima no desenvolvimento dos solos, como intemperismo, lixiviação e acúmulo de matéria orgânica.

- Covariáveis espaciais (fator N – posição)

Latitude e longitude – variáveis contínuas: utilizadas como proxies da localização geográfica, que capturam gradientes espaciais não explicitamente representados pelas outras covariáveis.

Recorrência de água – (MAPBIOMAS PROJECT, 2025): variável contínua: representa a frequência com que um local apresentou presença de água ao longo da série histórica disponível de 39 anos (1985–2023), indicando áreas sujeitas a alagamentos, planícies aluviais ou presença de corpos d’água intermitentes, que influenciam a deposição de materiais e a textura do solo.

3.3. Parametrização do modelo preditivo

A modelagem foi realizada separadamente para cada uma das duas variáveis-alvo transformadas: `log_silt_sand` e `log_clay_sand`, referentes às camadas de 0-30 cm. O modelo foi parametrizado com um número fixo de árvores (estimadores) e profundidade máxima controlada para evitar sobre-ajuste. Os hiperparâmetros ajustados incluíram: `n_tree`, número total de árvores na floresta (100), `mtry`, quantidade de variáveis testadas em cada divisão (16), `nodesize`, número mínimo de amostras necessárias para dividir um nó (2), `maxNodes`, limite máximo de nós por árvore (30), e `sampsize`, proporção da amostra utilizada para treinar cada árvore (0,632). O conjunto de covariáveis ambientais — previamente harmonizado e ajustado à resolução espacial de 30 metros — foi utilizado como entrada para o treinamento. A etapa de modelagem foi executada inteiramente na plataforma GEE, utilizando os recursos de computação paralela para processar grandes volumes de dados ambientais.

3.4. Predição espacial e mapeamento da granulometria do solo do estado do Maranhão

Após o treinamento, o modelo foi aplicado sobre a área de interesse para gerar mapas contínuos das razões logarítmicas entre frações granulométricas em resolução de 30 metros (Figura 4). Em seguida, os valores preditos foram transformados de volta para as frações originais (areia, silte e argila) por meio da inversão da log-ratio, respeitando a composição fechada dos dados e garantindo que as frações somem 100% (Figuras 5, 6 e 7). Essa abordagem permitiu integrar dados de solos e informações ambientais e algoritmos modernos de predição para gerar produtos espacialmente explícitos, com potencial de aplicação em diferentes escalas de gestão do território.

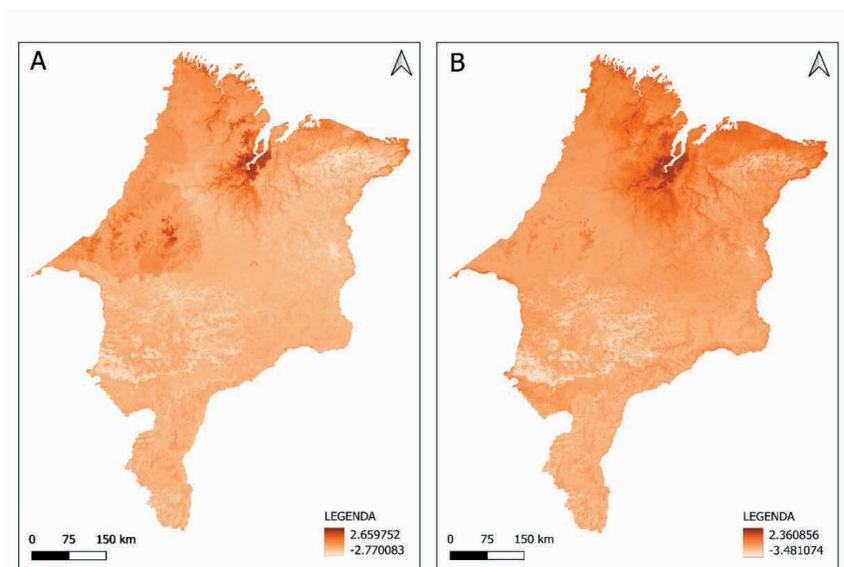


Figura 4. Predição espacial das log ratio - razões entre areia e argila (A) e areia e silte (B)

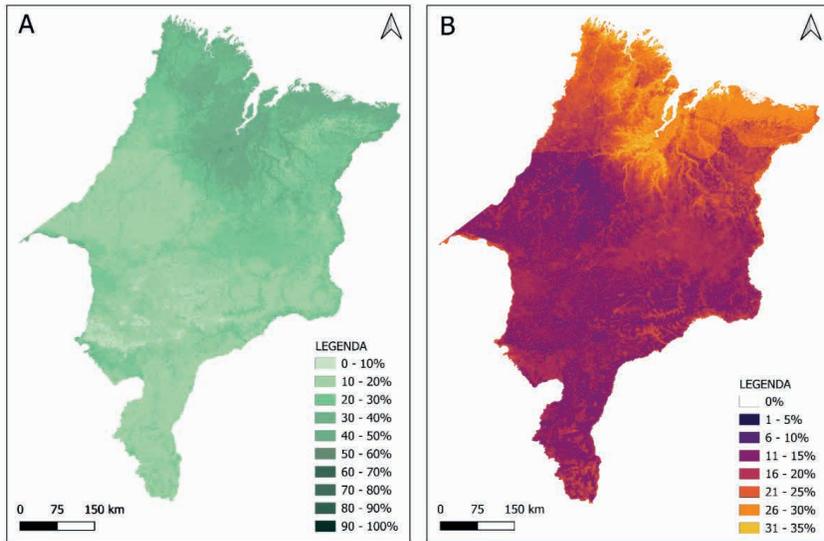


Figura 5. Predição espacial do teor de silte (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).

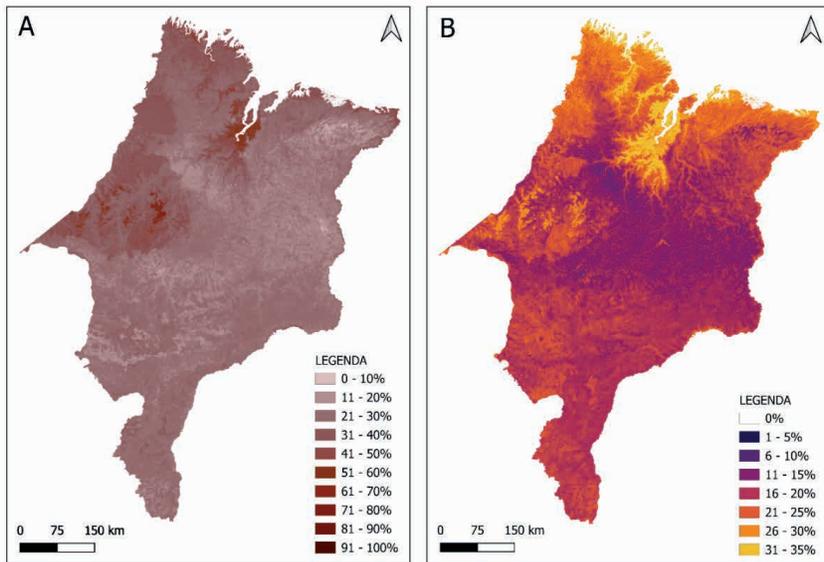


Figura 6. Predição espacial do teor de argila (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).

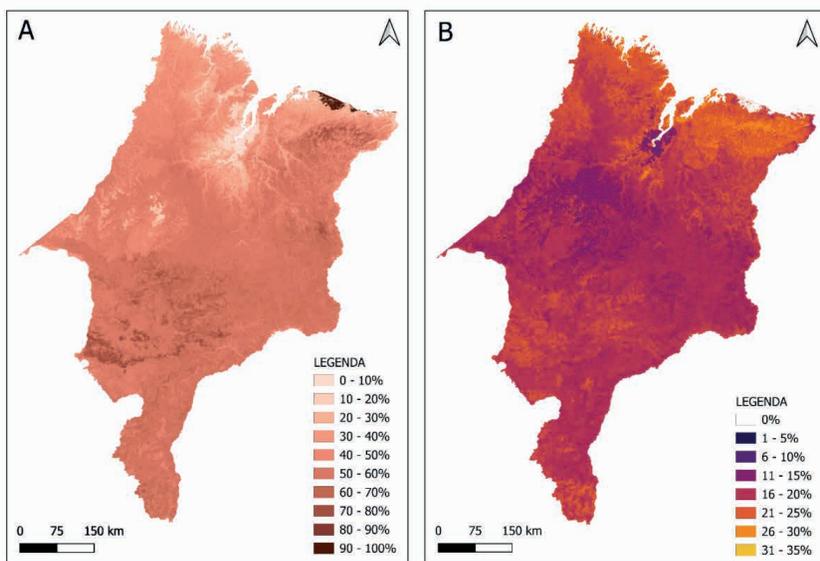


Figura 7. Predição espacial do teor de areia (A) e estimativa das incertezas associadas, representada pelo desvio padrão (B).

3.5. Avaliação dos modelos e mapas da granulometria

A avaliação do modelo de predição da granulometria foi realizada por meio de validação cruzada, técnica escolhida em função da quantidade limitada de dados disponíveis para o Maranhão, o que inviabilizaria a separação de um conjunto independente para a validação externa. A validação cruzada consiste em particionar os dados em subconjuntos de treino e teste utilizados de forma alternada, permitindo que todas as amostras contribuam tanto para o ajuste quanto para a avaliação do modelo. Apesar de fornecer estimativas ligeiramente mais otimistas, essa abordagem é amplamente aceita quando se busca aproveitar ao máximo os conjuntos de dados escassos ou heterogêneos disponíveis.

As métricas de desempenho dos modelos foram calculadas com base nas variáveis transformadas ($\log_{\text{silt_sand}}$ e $\log_{\text{clay_sand}}$), e incluíram ME, MAE, MSE, RMSE, MEC e slope. As avaliações foram realizadas tanto por camada (Tabela 1) quanto pela média dos perfis de solo (Tabela 2). Esses indicadores permitiram quantificar a precisão das estimativas das razões entre as frações texturais, assegurando consistência na avaliação do desempenho do modelo.

Tabela 1. Estatísticas de validação por camada de solo (%) — n = 404 camadas de 235 perfis de solo

	ME	MAE	MSE	RMSE	MEC	Slope
argila	0,0	7,1	110,7	10,5	0,8	1,0
silte	0,4	6,3	105,8	10,3	0,5	0,9
areia	-0,4	10,1	213,7	14,6	0,7	1,0

Em que: ME: erro médio; MAE: erro médio absoluto; MSE: erro quadrático médio; RMSE: raiz quadrada do erro médio; MEC: coeficiente de desempenho do modelo, slope: declividade da regressão.

Tabela 2. Estatísticas de validação médias por perfil de solo (%) — n = 235 perfis de solo

	ME	MAE	MSE	RMSE	MEC	Slope
argila	0,6	6,7	97,6	9,9	0,8	1,1
silte	0,0	0,8	111,6	10,6	0,5	1,0
areia	-0,6	10,5	222,0	14,9	0,6	1,0

Em que: ME: erro médio; MAE: erro médio absoluto; MSE: erro quadrático médio; RMSE: raiz quadrada do erro médio; MEC: coeficiente de desempenho do modelo, slope: declividade da regressão.

Para a geração dos mapas, o algoritmo Random Forest produziu múltiplas árvores de decisão, e cada árvore gerou uma predição independente para cada pixel da área de interesse. A média das predições foi utilizada como valor final da estimativa em cada pixel. O desvio padrão entre as predições individuais das árvores foi utilizado como uma medida de incerteza associada à predição. Esse desvio padrão expressa a variabilidade interna do modelo em relação à mesma entrada de dados, indicando em quais regiões do espaço as predições são mais dispersas em relação às médias e, portanto, mais incertas.

Assim, os **produtos** finais do exemplo incluem tanto os mapas preditos das frações granulométricas, quanto os respectivos mapas de incerteza (Figuras 4, 5 e 6), permitindo uma análise espacialmente explícita da confiabilidade das estimativas em cada ponto da paisagem.

4. APLICAÇÃO DO MDS NO MAPEAMENTO DE CLASSES DE SOLOS DO MARANHÃO

Neste item, será apresentado um exemplo prático de mapeamento digital de Classes de Solo para o estado do Maranhão. As etapas envolveram, de forma sequencial, os componentes operacionais do MDS — dados de treinamento, covariáveis predictoras, modelo preditivo, validação e geração de mapas, conforme amplamente descrito no item 3. As predições foram feitas com base em covariáveis

ambientais representativas dos fatores de formação do solo (conforme item 3.2.1). O processamento das covariáveis ambientais e as predições foram realizadas em ferramentas acessíveis, Quantum GIS v3.4.11 (<https://qgis.org/>) e ambiente R (R Core Team, 2021).

Para orientações detalhadas sobre como acessar e utilizar os dados e scripts necessários para reproduzir este exercício, consulte o item “Acesso aos dados” apresentado ao final deste capítulo.

4.1. Dados de treinamento

A base de dados utilizada para modelagem de classes de solos corresponde a uma coleção de perfis de solo georreferenciados, compilada do repositório SoilData de estudos pedológicos realizados entre os anos de 1973 a 2024 (Figura 8). A informação de cada perfil de solo referente à classificação taxonômica, foi atualizada até o segundo nível categórico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, SiBCS (Santos et al., 2018).

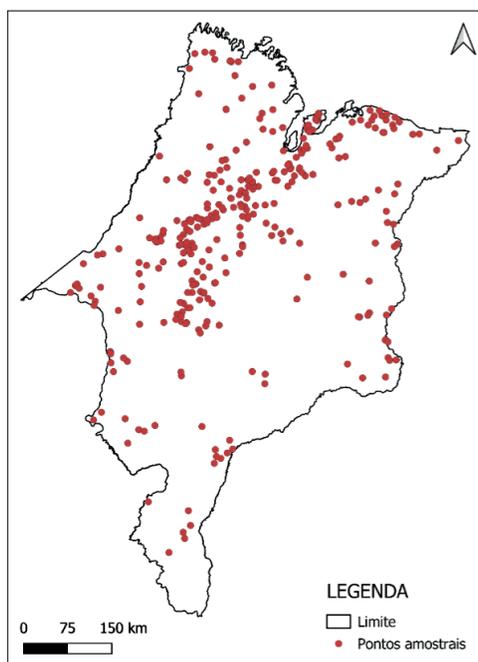


Figura 8. Distribuição espacial dos pontos amostrais utilizados como dados de treinamento no mapeamento de classes de solo do estado do Maranhão (n = 364).

Para o estado do Maranhão, foram compilados 222 perfis de solos, obtidos de diversas fontes. Foi observada pouca representatividade das seguintes classes de solos dentre os 222 perfis: Cambissolos Háplico (1 perfil), Gleissolos Melânicos (2 perfis), Gleissolos Tiomórficos (2 perfis), Latossolo Vermelho (1 perfil), Luvissolo Háplico (2 perfis), Plitossolos Pétricos (1 perfil), Organossolos Háplico (1 perfil), Vertissolos Hidromórfico (3 perfis). Então, optou-se por eliminar os perfis dessas classes, antes de proceder com a etapa de desenvolvimento do modelo preditivo, por não haver número suficiente de perfis para o processamento matemático. Isso resultou em um conjunto de 209 perfis de solos. Somado a essa base de dados, foram realizadas 155 pseudo-amostragens.

O processo de pseudo-amostragens foi realizado manualmente com base no mapa de solos do Maranhão, escala 1:1.000.000 (Embrapa, 1986) e na relação solo-paisagem do estado do Maranhão apresentada e discutida por Mendonça-Santos et al. (2020). Essas observações, somadas aos 209 perfis, totalizaram 364 observações contendo as classes taxonômicas de solos (2º nível categórico do SiBCS), as quais foram utilizadas para o exercício de MDS de classes de solo apresentado neste capítulo. Na tabela 3 é apresentada a distribuição do número de observações de perfil de solo e a pseudo-amostragem para cada classe de solo.

Tabela 3. Simbologia das classes de solos no 2º nível categórico do SiBCS e distribuição do número de perfis de solo e pseudo-amostragens de cada classe de solo das 364 observações utilizadas na predição e mapeamento das classes de solo do estado do Maranhão.

Subordem do SiBCS	Número de perfis/pseudo-amostragem (total)	% de observações no conjunto de dados
Argissolo Amarelo - PA	11/22 (33)	9
Argissolo Vermelho - PV	10/12 (22)	6
Argissolo Vermelho-Amarelo - PVA	52/13 (65)	18
Espodosolo - E	2/5 (7)	2
Gleissolo Háplico GX	19/15 (34)	9
Latossolo Amarelo LA	20/31 (51)	14
Neossolo Litólico - RL	5/13 (18)	5
Neossolo Flúvico - RY	4/18 (22)	6
Neossolo Quartzarênico - RQ	12/26 (38)	10
Plintossolo Háplico - FX	17/8 (25)	7
Plintossolo Argilúvico - FT	27/22(49)	13
Total	364	100

4.2. Modelo preditivo e covariáveis ambientais

O modelo preditivo adotado foi o mesmo algoritmo adotado na predição da granulometria – Random Forest. As covariáveis utilizadas como preditoras foram: fator R – topográficas (elevação, declividade, índice de posição topográfica, rugosidade do relevo, índice de convergência, índice de potência do fluxo, índice de umidade do terreno, curvatura planar, curvatura de perfil, curvatura geral, distância da rede de drenagem, profundidade do vale, formas do terreno, textura do terreno), fator organismos – vegetação (índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI), fator material de origem – geológicas (classe litológica - Províncias geológicas), fator clima – climáticas (classificação climática de Köppen), fator N – posição espacial (latitude e longitude, recorrência de água).

4.3. Parametrização do modelo preditivo e mapeamento das classes de solos do estado do Maranhão

Na implementação do modelo de RF, foram ajustados os seguintes hiperparâmetros: ntree, número de árvores na floresta (500), mtry, quantidade de variáveis testadas em cada divisão (12), nodesize, número mínimo de amostras necessárias para dividir um nó (3), e sampsize, proporção da amostra utilizada para treinar cada árvore (7). O conjunto de covariáveis ambientais foi utilizado como entrada para o treinamento. Após essa etapa o modelo foi aplicado sobre a área de interesse para gerar o mapa de classes de solo em resolução de 30 metros (Figura 9). O resultado é o mapa de probabilidade individual de ocorrência de cada classe de solo (Figura 9), computado pela classe de maior probabilidade de ocorrência no píxel para gerar o mapa de classes de solos (Figura 10). Toda a etapa de modelagem foi executada inteiramente no ambiente R (R Core Team, 2021).

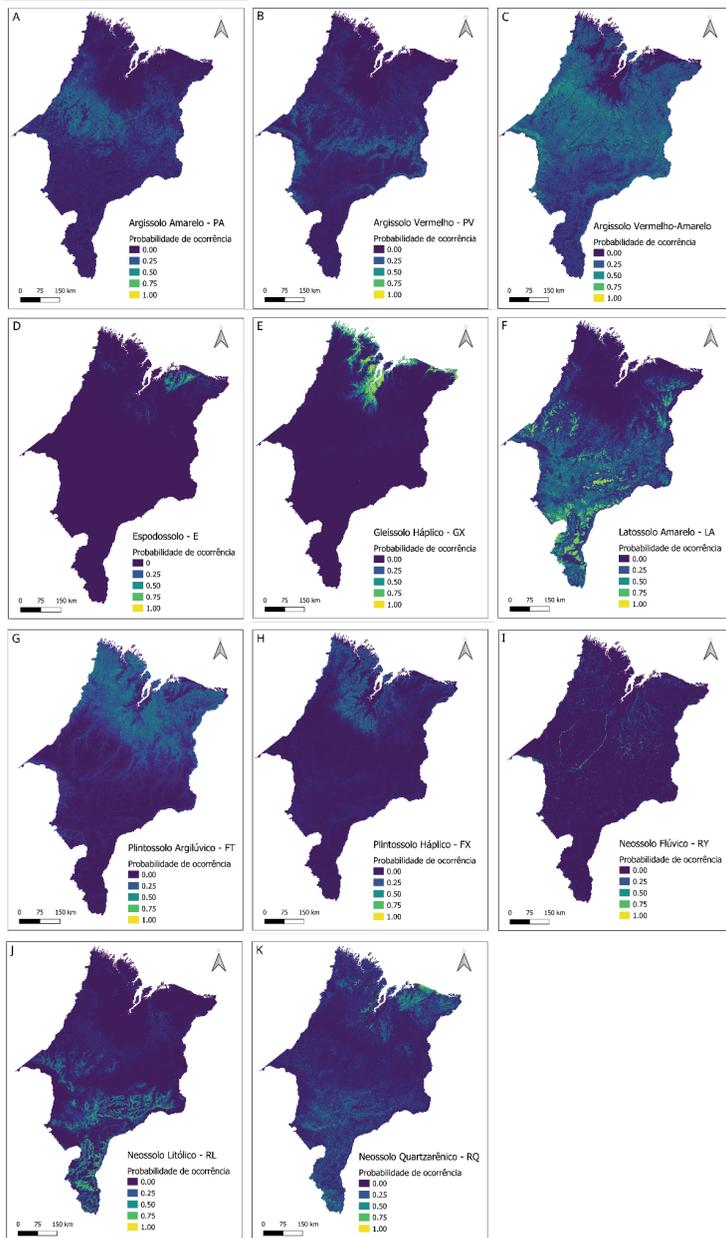


Figura 9. Probabilidade de ocorrência de cada classe de solo. A) Argissolo Amarelo, B) Argissolo Vermelho, C) Argissolo Vermelho-Amarelo, D) Espodossolo, E) Gleissolo Háptico, F) Latossolo Amarelo, G) Plintossolo Argilúvico, H) Plintossolo Háptico, I) Neossolo Litólico, J) Neossolo Flúvico, K) Neossolo Quartzarênico.

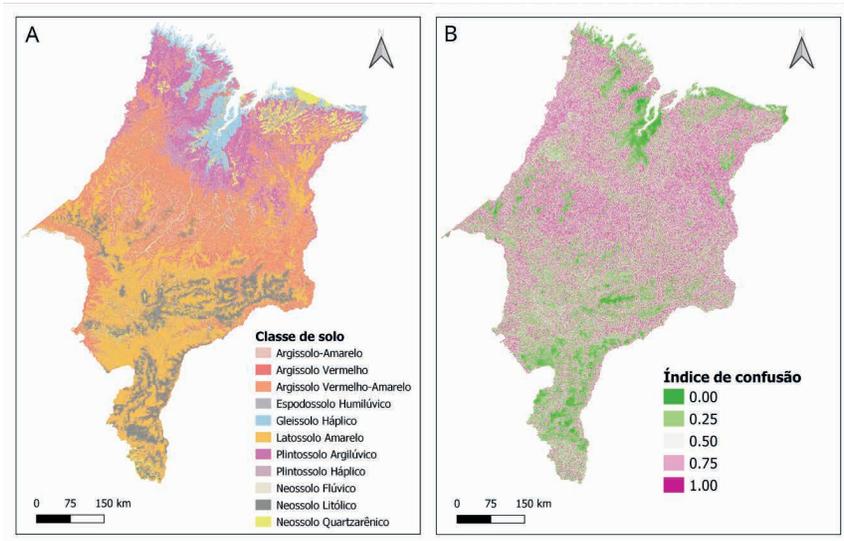


Figura 10. Predição e mapeamento de classes de solos do estado do Maranhão (A) e mapa de incertezas associadas – índice de confusão (B).

5. AVALIAÇÃO DO MODELO DE PREDIÇÃO E DO MAPA PRODUZIDO

A avaliação do modelo de predição de classes de solo foi realizada por meio de validação cruzada. Foi escolhida essa técnica devido à quantidade limitada de observações disponíveis para cada classe de solo no conjunto de dados do Maranhão e por tratar-se de variável-alvo categórica, classes de solos. Foram geradas as matrizes de confusão, obtendo-se os valores de acurácia global – AG e acurácia da classe - AC. A AG foi calculada para avaliar a proporção de píxeis corretamente preditos em relação ao número de píxeis totais nos mapas; e a AC foi utilizada para avaliar a proporção de píxeis corretos de cada classe de solo (Congalton, 1991). A avaliação da incerteza do modelo de predição foi realizada por meio da estatística do índice de confusão - IC (Burrough et al., 1997), o qual varia entre 0 e 1, onde 1 significa máxima confusão (mínima precisão) e 0 a mínima confusão (máxima precisão), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Acurácia por classe de solo (AC) e Acurácia global (AG) na validação cruzada.

Classe de Solo	Acurácia por classe (%)
Argissolo Amarelo - PA	56
Argissolo Vermelho - PV	55
Argissolo Vermelho-Amarelo - PVA	56
Espodossolo - E	78
Gleissolo Háplico GX	85
Latossolo Amarelo LA	81
Neossolo Litólico - RL	94
Neossolo Flúvico - RY	91
Neossolo Quartzarênico - RQ	67
Plintossolo Háplico - FX	58
Plintossolo Argilúvico - FT	67
Acurácia global - AG (%)	56

O mapa predito de classes de solos (Figura 10A) apresentou uma acurácia global (AG) de 56%. Em relação à acurácia de cada classe de solo, para os Neossolos Litólicos foi observada uma maior acurácia (94%), seguido dos Neossolos Flúvicos (91%), Gleissolos Háplicos (85%), Latossolos Amarelos (81%), Espodossolos (78%), Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos Argilúvicos (67%), Plintossolos Háplicos (58%), Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos (56%) e Argissolos Vermelhos (55%). As acurácias mais baixas foram encontradas para as classes dos Argissolos Amarelos, Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos. A menor AC observada para algumas classes de solo pode ser explicada pela baixa representatividade de perfis no conjunto de dados, somado-se à ocorrência de duas ou mais classes em ambientes semelhantes (mesmos intervalos de valores das covariáveis predictoras) na paisagem, por exemplo, Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos, Plintossolos Argilúvicos e Plintossolos Háplicos. Segundo Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2015), a distribuição espacial e número de amostras representativas de cada classe de solo influencia a qualidade dos mapas digitais de classe de solos. Isso foi observado também por ten Caten et al. (2011) e Moura-Bueno et al. (2019) no MDS no Estado do Rio Grande do Sul, em que classes menos representativas tiveram sua predição comprometida.

No mapa de incertezas da predição de classes de solos (Figura 10B), pode-se observar os locais da paisagem onde o modelo de predição foi mais preciso (valores próximos de "zero") e menos preciso (valores próximos de "um"). As áreas com maior incerteza estão relacionadas à baixa representatividade de perfis de solo, com destaque para as classes de solos dos Argissolos Vermelhos (PV) e Argissolos Amarelos (PA), que apresentaram a menor acurácia da predição. Além disso, essas classes

ocorrem em posições semelhantes da paisagem, sendo de difícil discriminação por modelos matemáticos e até mesmo por pedólogos no campo, quando existe escassez de perfis de solo na base de dados. Nota-se que nas áreas onde predominam a classe dos Latossolos Amarelos (LA), Gleissolos Háplicos (GX) e Neossolos Litólicos (Figura 10A), as incertezas são menores (valores próximos de “um”) no mapa da Figura 10B.

6. BOAS PRÁTICAS EM MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS

A adoção do MDS tem se expandido em diferentes contextos — acadêmico, produtivo e institucional — devido à sua capacidade de gerar informações espaciais detalhadas sobre atributos do solo. No entanto, para que seus resultados sejam confiáveis, úteis e reprodutíveis, é necessário seguir um conjunto de boas práticas que abrangem desde o planejamento amostral até a divulgação dos produtos finais.

Uma boa prática fundamental é garantir que a variável-alvo esteja claramente definida e seja pedologicamente significativa. A escolha de uma propriedade ou função do solo para a modelagem deve estar ancorada na compreensão da sua relação com os fatores ambientais. Além disso, a natureza da variável (contínua ou categórica) determinará os métodos mais adequados de modelagem, validação e representação da incerteza.

No que se refere aos dados de solo, é essencial assegurar que sejam obtidos por métodos laboratoriais reconhecidos, com georreferenciamento preciso e metadados bem documentados. O uso de dados legados pode ser vantajoso, desde que haja cuidados com a harmonização e a rastreabilidade. A densidade e a distribuição espacial das amostras devem ser planejadas visando capturar a variabilidade ambiental, e não simplesmente atingir um número arbitrário de pontos.

As covariáveis ambientais utilizadas devem ter relação plausível com os processos pedogenéticos e serem escolhidas com base em critérios teóricos, além de análises exploratórias. Covariáveis redundantes, fortemente correlacionadas ou irrelevantes podem comprometer a eficiência do modelo e aumentar o risco de overfitting. A seleção pode ser orientada por conhecimento especializado, testes estatísticos, análise de importância de variáveis ou técnicas automatizadas de redução de dimensionalidade.

Na etapa de modelagem, recomenda-se iniciar com abordagens simples e compreensíveis, avançando para algoritmos mais complexos, à medida que se compreendem os dados e suas relações. A transparência no uso dos algoritmos, incluindo seus parâmetros e processos de ajuste, é essencial para garantir a reprodutibilidade do estudo. Sempre que possível, a estrutura dos roteiros (scripts) e a documentação completa do fluxo de trabalho devem ser disponibilizadas em repositórios acessíveis.

A validação do modelo não deve ser tratada como etapa opcional. O uso de validação externa, quando viável, oferece maior robustez à avaliação. Quando se opta pela validação cruzada, é importante relatar claramente as limitações e os possíveis vieses. Além das métricas de desempenho, a inclusão de mapas de incerteza amplia a compreensão dos resultados e permite seu uso mais cauteloso.

Por fim, os produtos gerados — como mapas, gráficos, relatórios e roteiros scripts — devem ser comunicados de forma clara, com legenda, escala, unidades e metadados completos. A explicitação das limitações do estudo, como áreas com alta incerteza ou baixa densidade amostral, é um sinal de rigor científico e fortalece a credibilidade dos resultados. A adoção de princípios de ciência aberta, como o compartilhamento de dados e métodos, contribui para o avanço coletivo da ciência do solo e favorece a replicação e a melhoria contínua das abordagens.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O MDS representa uma abordagem moderna e eficiente para transformar observações pontuais em informações espaciais contínuas, com potencial de aplicação em diversas escalas e contextos e com economia de tempo e recursos. Sua força reside na combinação entre conhecimento pedológico, dados ambientais e métodos quantitativos, permitindo compreender e representar a variabilidade dos solos de forma mais transparente e reprodutível.

Ao aplicar esses princípios à predição da granulometria e classe de solos do Maranhão, foi evidenciado o potencial do MDS como ferramenta de apoio ao planejamento territorial, manejo agrícola e conservação dos recursos naturais. A adoção de boas práticas, como o uso de transformações adequadas, validação cuidadosa, análise da incerteza e fundamentação pedológica das decisões, é o que garante a utilidade e a credibilidade dos mapas gerados. Mais do que um produto final, o MDS deve ser compreendido como um processo contínuo de aprendizado sobre o solo na paisagem, que pode ser melhorado e aperfeiçoado com a disponibilidade de mais informações de solos para se ter uma maior cobertura e distribuição espacial dos pontos amostrados.

8. ACESSO AOS DADOS USADOS NAS MODELAGENS

Os dados utilizados neste capítulo estão disponíveis publicamente em diferentes plataformas. Todos os dados de treinamento encontram-se no SoilData, no Identificador de Objeto Digital (DOI): <https://doi.org/10.60502/SoilData/HO1DT7> com conjunto denominado “Mapeamento Digital de Solos do Maranhão: fundamentos, boas práticas e exemplos de mapeamento de classes e atributos”. Ele reúne, no arquivo “granulometria_amostras” 489 amostras com teores de areia, silte e argila, além

das variáveis transformadas por log-ratio (`log_clay_sand` e `log_silt_sand`). Os scripts correspondentes, escritos em linguagem JavaScript para execução no Google Earth Engine (GEE), estão organizados no repositório GitHub `solos-maranhao` (<https://github.com/taciaraz/solos-maranhao>), nas pastas `covariate-module`, `modeling` e `predicao-espacial`. As covariáveis necessárias para a execução destes scripts são carregadas diretamente do repositório `MapBiomias Workspace` no próprio GEE, dispensando download prévio.

Para o mapeamento de classes de solo, o mesmo conjunto do `SoilData`, o arquivo `"classe_de_solo_amostras"`, disponibiliza 364 observações com as classes taxonômicas de solos no 2º nível categórico do SiBCS. O processamento é realizado por meio de um script em linguagem R, disponível na pasta `classe-solo` do mesmo repositório GitHub, que deve ser executado em ambiente R configurado com os pacotes necessários. Nesse caso, as covariáveis utilizadas precisam ser previamente baixadas a partir do endereço https://drive.google.com/drive/folders/1sGOP6-b7p9ERx5tidED47mUN7Z_MD4DC.

Informações detalhadas sobre a organização dos scripts, a execução dos modelos e a lista completa das covariáveis empregadas podem ser consultadas no arquivo README do repositório GitHub disponível em <https://github.com/taciaraz/solos-maranhao>.

REFERENCIAS

AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, v. 44, p. 139-177, 1982.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GON, J. L. de; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMATULLI, G. et al. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific Data*, v. 5, 180040, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.40>.

AMATULLI, G. et al. Geomorpho90m: empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers. *Scientific Data*, v. 7, 162, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0479-6>.

BURROUGH, P. A.; VAN GAANS, P. F.; HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma*, v. 77, p. 115–135, 1997.

CANCIAN, L. C.; DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. T. Bibliometric analysis for pattern exploration in worldwide digital soil mapping publications. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, n. 4, p. 3911-3923, 2018.

COELHO, M. L. et al. Systematic review on digital soil mapping in Brazil: current status and future perspectives. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0200115, 2021.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.

DOKUCHAEV, V. V. Russian Chernozem. Trad. para o inglês por N. Kaner. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Ltd. (para USDA-NSF), 1967. Originalmente publicado em 1883.

EMBRAPA. Mapa de Solos do Maranhão. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1986. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336095>.

FAO. Global status of black soils. Rome: FAO, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc3124en>.

GIASSON, E. et al. Mapeamento digital de solos para a área de estudo do projeto "Usinas da Paz" no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (ed.). Digital soil mapping with limited data. Berlin: Springer, 2008.

HENDRIKS, S. et al. Exploring the potential of legacy soil data for digital soil mapping in Brazil. In: International Conference on Digital Soil Mapping, 4., 2019, Wageningen. Wageningen: Wageningen University & Research, 2019.

HENGL, T. et al. SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. *PLOS One*, v. 12, e0169748, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>.

HORST, T. Z. Variação de parâmetros dendrométricos de *Pinus taeda* L. e a distribuição espacial de atributos do solo por técnicas de mapeamento digital de solos. 2017. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

HORST, T. Z. et al. Mapeamento digital de solos do Maranhão: fundamentos, boas práticas e exemplos de mapeamento de classes e atributos. *SoilData*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.60502/SoilData/HO1DT7>. Acesso em: 8 ago. 2025.

IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000. Relatórios metodológicos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE. Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA): Mapeamento de Recursos Naturais (MRN): Escala 1:250 000. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

JENNY, H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941.

LAGACHERIE, P. et al. Digital soil mapping: an introductory note for the Geoderma special issue on digital soil mapping. *Geoderma*, v. 136, n. 1, p. 1-2, 2006.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (ed.). Digital soil mapping: an introductory perspective. Amsterdã: Elsevier, 2007.

MAPBIOMAS. Mapeamento anual do estoque de carbono orgânico do solo no Brasil 1985-2021 (coleção beta). Documento de base teórica do algoritmo e resultados. 2023. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/3KXXVV>.

MAPBIOMAS PROJECT. MapBiomias General “Handbook” - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) - Collection 9. 2025. DOI: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/ICCL5B>.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, v. 117, n. 3-4, p. 297-324, 2003.

MENDONÇA-SANTOS, M. de L. et al. Aplicação de técnicas de mapeamento digital de solos no âmbito do zoneamento ecológico-econômico do bioma Amazônia no Maranhão. 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1129349>.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. et al. Digital soil mapping of the state of Maranhão, Brazil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2020.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. et al. Mapeamento digital do carbono orgânico do solo no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. The state of the art of Brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (ed.). Digital soil mapping: an introductory perspective. Amsterdã: Elsevier, 2007. p. 487-502.

MENDONÇA-SANTOS, M. de L. et al. Mapeamento digital de solos no estado do Rio de Janeiro, Brasil: dados, modelagem e predição. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (ed.). Digital soil mapping with limited data. Berlim: Springer, 2006. p. 381-396.

MOURA-BUENO, J. M. de et al. Digital soil mapping of soil classes in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, using legacy data and Random Forest. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 43, e0180211, 2019.

MOURA-BUENO, J. M. et al. Prediction of soil classes in a complex landscape in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 54, e00420, 2019.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 5 ago. 2025.

SAMUEL-ROSA, A. et al. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? *Geoderma*, v. 243, p. 214-227, 2015.

SAMUEL-ROSA, A. et al. SoilData: a free Brazilian repository of soil data. In: Congresso Mundial de Ciência do Solo, 21., 2018, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.

SAMUEL-ROSA, A. Funções de predição espacial de propriedades do solo. 2012. 201 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

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

STUMPF, R. et al. A novel approach for mapping soil classes using legacy data in the Brazilian Amazon. In: International Conference on Digital Soil Mapping, 2., 2016, Piracicaba. Piracicaba: ESALQ/USP, 2016.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R. et al. Digital mapping of soil properties in a small catchment in northern Iran. *Geoderma*, v. 257, p. 167-175, 2015.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 53-62, 2011.

TEN CATEN, A. et al. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*, v. 42, p. 1989-1997, 2012.

VASQUES, G. M. et al. Digital soil organic carbon map of Brazil for the Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap). In: International Workshop on Global Soil Organic Carbon Map, 2., 2017, Roma. Roma: FAO, 2017.

YAMAZAKI, D. et al. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, v. 44, p. 5844–5853, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>.



CAPÍTULO 9

SENSORIAMENTO REMOTO PARA A GESTÃO DO SOLO: UMA PROPOSTA PARA AMBIENTES URBANOS, AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO ESTADO DO MARANHÃO

Denilson da Silva Bezerra

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Felipe Martins Sousa

Mestrando - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto (SR) pode ser compreendido como a utilização de princípios físicos para a obtenção de informações de objetos/alvos, dessa forma, trata-se de uma tecnologia essencial para a coleta de informações sobre a superfície terrestre sem a necessidade de contato físico direto. Normalmente são utilizados sensores instalados em satélites, drones, aviões ou até mesmo em plataformas móveis, essa técnica permite a obtenção de dados que são posteriormente analisados para diversas finalidades, como monitoramento ambiental, planejamento urbano, agricultura de precisão, entre outras.



Figura 1. Esquema ilustrativo dos princípios do SR.

Os princípios físicos básicos do SR podem ser sumarizados na ação física caracterizada pela interação da radiação eletromagnética (REM) com os objetos/ alvos presentes na superfície da Terra, cabendo enfatizar que a principal fonte de REM é oriunda do Sol. No momento que a REM incide sobre um alvo/objeto ocorre uma resposta física (comportamento espectral), ou seja, a REM pode ser refletida (a “luz” pode e volta), absorvida pela superfície do material ou transmitida, dependendo das propriedades do material e do comprimento de onda da radiação. Os sensores remotos acoplados às plataformas (satélites, drones e etc.) captam essa radiação refletida ou emitida, permitindo a análise das características do objeto ou área em questão. Os sensores podem ser classificados em duas categorias, os “passivos” e os “ativos” conforme, respectivamente, a descrição abaixo:

- Sensores Passivos: Captam a radiação natural refletida ou emitida pelos objetos/alvos, como a luz solar. Um exemplo clássico são as câmeras fotográficas que registram imagens visíveis.
- Sensores Ativos: Emitem sua própria radiação e medem a resposta dos objetos/alvos a essa radiação. O radar é um exemplo de sensor ativo, que utiliza ondas de rádio para obter informações sobre a superfície terrestre.

A literatura científica tem evidenciado que o SR é uma poderosa ferramenta para o estudo do solo, possibilitando a análise e monitoramento de suas características de forma eficiente e em larga escala. Por meio de sensores instalados em satélites ou drones, é possível captar informações sobre a composição, umidade, textura e uso do solo sem a necessidade de amostragens físicas extensivas (Anneli et al., 2021; Abdulraheem et al., 2023).

Essa tecnologia permite a identificação de diferentes tipos de solo e a detecção de alterações provocadas por atividades agrícolas, urbanas ou naturais. Além disso, o SR é utilizado para monitorar a erosão, compactação e degradação do solo, contribuindo para o manejo sustentável e a recuperação ambiental.

Face ao exposto nos parágrafos acima, o presente capítulo tem por objetivo apresentar uma breve descrição das principais técnicas em SR que podem ser usadas para monitorar as formas de uso e cobertura do solo no meio urbano, agrícola e florestal. De forma mais específica, este capítulo abordará três categorias de SR que podem ser utilizadas no monitoramento e estudos dos solos, a saber: SR Óptico, SR Térmico e SR Ativo: SAR e LiDAR.

2. SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO

O sensoriamento remoto óptico refere-se ao uso de sensores que medem a radiação refletida ou emitida nas faixas do visível, próximo-infravermelho e infravermelho de onda curta para caracterizar superfícies terrestres. Em solos, a assinatura espectral obtida por imagens multiespectrais e hiperespectrais revela informação sobre cor, matéria orgânica, minerais, textura aparente e, indiretamente, umidade superficial, importante destacar que tais propriedades são fundamentais para análises ambientais e de uso do solo (bem-Bem-Dor et al., 2009).

No ambiente agrícola, o SR óptico permite mapear variáveis essenciais ao manejo: estimativas espaciais de carbono orgânico do solo, salinidade, e padrões de erosão ou perda de solo quando combinadas com técnicas de aprendizado de máquina (Machine Learning/ML) e séries temporais. Essas informações suportam agricultura de precisão que pode ter efeitos positivos na otimização da adubação, irrigação e práticas de conservação, o que por sua vez, pode reduzir custos e potenciais impactos ambientais. Estudos recentes mostram ganhos importantes quando imagens hiperespectrais são integradas a modelos que calibram medições de campo (Abdulraheem et al., 2023; Ranzhe et al., 2024).

Em formações florestais, sensores ópticos são úteis para identificar variações de solo exposto, substrato mineral e condições de umidade no dossel inferior, além de monitorar processos de degradação, compactação e perda de matéria orgânica após distúrbios (como por exemplo, focos de calor e desmatamento). Importante também mencionar que a sensibilidade espectral a minerais e a matéria orgânica ajuda a entender a regeneração do solo e a capacidade de suporte da vegetação (Ben-Dor et al., 2009).

No contexto do ambiente urbano, o sensoriamento óptico pode auxiliar no mapeamento de compactação do solo (impermeabilização), identificação de áreas verdes em relação superfícies pavimentadas e detecção de contaminantes superficiais. Essas informações especializadas são valiosas para o planejamento urbano, avaliação de risco de enchentes e projetos de recuperação de solos e espaços verdes, onde a resolução espacial e a classificação de imagens fazem diferença para decisões locais e até regionais.

Apesar das vantagens descritas acima, também há limitações que precisam ser levadas em consideração, tais como: as técnicas de SR óptico são sensíveis à cobertura vegetal, umidade superficial e atmosfera, sendo, portanto, necessário, sempre que possível, a calibração com amostras de campo, bibliotecas espectrais e correções radiométricas/geométricas (Abdulraheem et al., 2023). Em síntese, o SR óptico é uma ferramenta rápida, escalável e econômica que, quando integrada a métodos de campo e algoritmos modernos, transforma o entendimento e a gestão dos solos em ambientes agrícolas, florestais e urbanos.

Por fim, cabe mencionar que o SR óptico pode ser considerado como uma categoria “padrão”, uma vez que, faz uso da faixa visível das ondas eletromagnéticas da principal fonte de radiação da Terra (o Sol), mas existem outros grupos de SR que serão destacados no presente capítulo, que não pertencem à categoria padrão, estes são: SR espectral, SR termal e baseado em RADAR.

A Fig. 2 fornece uma visão geral e os estágios dos métodos de SR não óptico para análise de solo (análise de refletância espectral, imagens infravermelhas térmicas e sensoriamento remoto por radar); ferramentas para monitoramento de solo (por exemplo, LiDAR, hiperespectral, infravermelho visível, scanners, câmeras, etc.) com várias aplicações de SR, bem como as partes de SR usadas no monitoramento do solo, e que serão descritas nos tópicos que seguem abaixo.

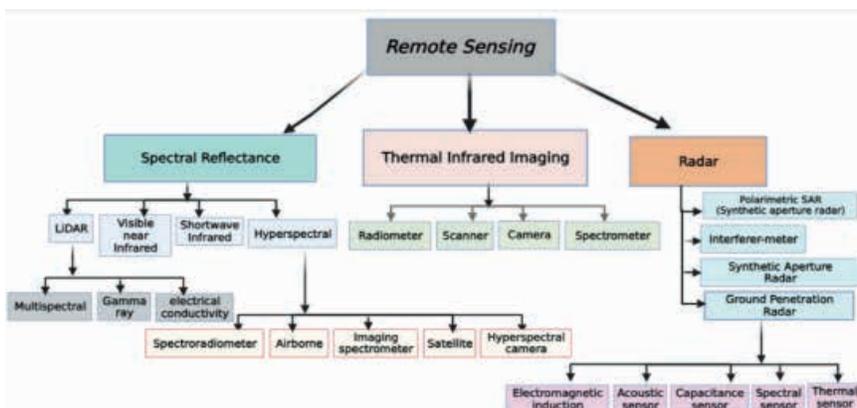


Figura 2. Alguns métodos (não ópticos) e tipos de sensoriamento remoto em medições de solo. Fonte: Abdulraheem et al. (2023)

3. SENSORIAMENTO REMOTO TÉRMICO (LST) E BALANÇO DE ENERGIA VIA SENSORES TERMAIS (INFRAVERMELHO TÉRMICO)

O SR térmico, por meio de sensores na banda do infravermelho térmico, permite estimar a Land Surface Temperature (LST), ou seja, a temperatura da superfície terrestre, que permite a compreensão do balanço de energia entre o solo e a atmosfera (Nimish, Bharath and Lalitha, 2020).

No ambiente agrícola, variações na LST refletem diferenças na umidade do solo, cobertura vegetal e estresse hídrico: solos secos e expostos aquecem-se mais rapidamente, enquanto vegetação saudável reduz a LST via evapotranspiração (Heinemann et al., 2020). Ou seja, o monitoramento de localidades com baixa precipitação, como o Semiárido Brasileiro, via métodos baseados em LST ajuda a identificar áreas de déficit hídrico e otimizar práticas como irrigação e manejo do solo.

Em ambientes florestais, a vegetação mais densa tende a manter temperaturas superficiais mais baixas, por meio de processos como a evapotranspiração e maior inércia térmica, contudo em áreas sob forte influência antrópica, onde ocorre desmatamentos e/ou forte fragmentação florestal há eventos de aumento da LST, contribuindo para alterações microclimáticas e secas locais, dessa forma, o uso do SR Térmico em formações florestais pode ser usado para identificação de áreas conservadas e para o monitoramento de degradadas ou em processo de degradação (Reiners, Sobrino and Kuenzer, 2023). Também é importante mencionar, que a literatura científica indica que o uso do acompanhamento da variação da LST é um indicador eficaz para monitoramento de fenologia vegetal, como dinâmica de crescimento e também, para a identificação de eventos extremos (ex.: secas e queimadas) nas florestas.

No contexto urbano, a LST é fundamental para mapear a distribuição espaço-temporal do fenômeno da Ilha de Calor Urbana (UHI). Áreas densamente pavimentadas e/ou com solos expostos retêm e irradiam calor de maneira mais intensa que regiões vegetadas, elevando a temperatura do solo e do ar nos centros urbanos (Nimish, Bharath and Lalitha, 2020; Kaiser et al., 2022). Dessa forma, o uso do mapeamento térmico pode permitir o planejamento de intervenções como criação de parques, vegetação urbana e superfícies permeáveis para mitigar o aquecimento local (Jamali, Khaledi and Razavian, 2021; Mallick et al., 2022).

Entre os principais métodos que utilizam LST no cálculo do balanço de energia, destacam-se o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e o BAITSSS (Bastiaanssen Adaptation of the Two-Source Surface Energy Balance System). O SEBAL trata a superfície terrestre como um todo e calcula a evapotranspiração a partir do balanço entre radiação líquida, fluxo de calor no solo e fluxos de calor sensível e latente, usando LST e dados meteorológicos.

Já o BAITSSS segue a abordagem de duas fontes, separando a contribuição da vegetação e do solo exposto, o que permite análises mais precisas em áreas heterogêneas, como mosaicos agrícolas ou florestas com clareiras. Ambos os modelos são amplamente utilizados no monitoramento hídrico, no manejo agrícola, na avaliação de áreas degradadas e no estudo do microclima urbano.

Em resumo, o SR térmico e a análise da LST oferecem uma visão integrada dos fluxos energéticos nos solos, destacando a dinâmica hídrica, tipo de cobertura, estresse térmico e impactos da urbanização ou manejo florestal. Tais insights são cruciais para a gestão sustentável do solo, da água e do microclima nos diferentes ambientes (agrícola, florestal e urbano), podendo subsidiar dessa forma, ações de mitigação e adaptação frente a desafios ambientais do século XXI.

4. SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO: RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) E LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING)

O sensoriamento remoto ativo com radar de abertura sintética (SAR) e LiDAR tornou-se central para investigar solos em diferentes escalas, pois ambos “enxergam” além das limitações do óptico (radiação solar); o SAR pela sensibilidade à estrutura dielétrica/umidade e o LiDAR pela capacidade de medir com precisão a microtopografia e a estrutura da superfície/vegetação. Em ambientes agrícolas, florestais e urbanos, essas duas categorias de sensores são complementares: o SAR descreve processos hídricos e de rugosidade do solo, enquanto o LiDAR fornece o relevo de uma forma extremamente detalhada, o que pode facilitar o entendimento de processos de fluxos de água, erosão e impermeabilização (Shukla et al., 2023).

No ambiente agrícola, o SAR (C-band do Sentinel-1, por exemplo) é amplamente usado para estimar umidade do solo superficial a partir do retroespalhamento, que responde à constante dielétrica do solo e à rugosidade. A literatura científica mais recente tem demonstrado avanços na inversão física e no uso de aprendizado de máquina para melhorar a acurácia, incluindo integração com dados meteorológicos e controle de efeitos da cobertura vegetal (modelo de nuvem d’água, decomposição e métodos híbridos). Em campos cultivados, erros aumentam com dosséis densos e variação de rugosidade entre operações de preparo; ainda assim, abordagens atuais no Sentinel-1 já produzem mapeamentos autônomos de alta resolução para áreas agrícolas expostas, e modelos de ML vêm reduzindo viés sob culturas como trigo. Essas informações orientam irrigação, manejo de estresse hídrico e conservação do solo (Mardan & Ahmadi, 2021; Roy et al., 2025; Lakra et al., 2025).

Em florestas, o SAR ajuda a detectar distúrbios (clareiras, deslizamentos, queimadas) que expõem o solo e alteram o regime hídrico, enquanto o LiDAR (aéreo ou terrestre) pode ser usado para captar a estrutura do dossel e, sobretudo, Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução que revelam canais efêmeros, cabeceiras e microdepressões que concentram escoamento e condicionam a umidade do solo. Estudos mostram que índices derivados de MDE/LiDAR, combinados a algoritmos como Extreme Gradient Boosting, mapeiam padrões de umidade de solo em paisagens florestais; outros trabalhos usam LiDAR para quantificar erosão em sulcos, volumes remobilizados. Esse mapeamento microtopográfico permite modelar a conectividade hidrológica, suscetibilidade à erosão e recarga em encostas (Anneli et al., 2021; Chen et al., 2025).

No meio urbano, o SAR é valioso porque independe da iluminação solar e atravessa nuvens, permitindo monitorar enchentes rápidas, impermeabilização e a interface solo e áreas construídas. Métodos operacionais combinam SAR multitemporal com produtos de uso e cobertura da terra para acelerar o mapeamento

de inundação urbana, inclusive distinguindo “double-bounce¹” em áreas construídas alagadas. Em contrapartida, o LiDAR fornece superfícies de elevação detalhadas (terreno e superfície), essenciais para entender drenagem, acúmulo de água em microdepressões e planejar soluções baseadas na natureza (bacias de retenção, ruas verdes), reduzindo erosão e transporte de sedimentos originados de solos expostos de obras e taludes urbanos (Zhou et al., 2019).

Para os ambientes agrícola, urbano e de florestas, o LiDAR destaca-se quando o objetivo é medir o relevo que controla processos do solo. Revisões recentes demonstram que MDE/LiDAR (aéreo e terrestre) capturam microtopografia milimétrica a centimétrica crítica para processos de erosão, selamento e dinâmica de umidade, resultados raramente obtidos por MDE obtidos por métodos convencionais. Os dados obtidos por meio do LiDAR permitem derivar índices de terreno (curvatura, índice topográfico de umidade, fluxo específico) que, em modelos estatísticos e baseados em processos, explicam padrões de umidade, susceptibilidade à incisão e caminhos de escoamento. Em ecossistemas naturais e agrícolas, tal detalhamento pode reduzir incertezas em estimativas de perda de solo e pode melhorar o diagnóstico de áreas prioritárias para práticas conservacionistas (Shukla et al., 2023).

Já o SAR é especialmente potente para dinâmica hídrica, nos ambientes levados em consideração no presente capítulo). A literatura recente enfatiza a integração entre radar (ativo) e radiometria de micro-ondas (passiva) para suprimir ambiguidades e melhorar estimativas de umidade do solo; técnicas de decomposição polarimétrica e modelos como o Improved Water Cloud Model vêm sendo testados em diferentes culturas. Em áreas agrícolas descobertas, soluções “autônomas” com Sentinel-1 mostram desempenho promissor para mapas operacionais; sob dossel e em mosaicos heterogêneos, a assimilação de dados e ML vêm ganhando espaço. Em síntese, o SAR complementa o LiDAR ao quantificar o estado hídrico que o relevo (medido pelo LiDAR) ajuda a explicar (Mardan e Ahmadi, 2021; Ettalbi et al., 2023).

A sinergia SAR-LiDAR é, portanto, estratégica e uma boa opção para pesquisadores e técnicos interessados em aplicações práticas. Em agricultura, MDE/LiDAR refina a modelagem de fluxo de calor no solo e distribuição de água (microrelevo controla lâmina de irrigação, encharcamento e formação de crostas), enquanto séries temporais SAR capturam o pulso de umidade após chuvas ou irrigações, permitindo intervenções de manejo no tempo certo. Em florestas, LiDAR pode ser usado para mapear a estrutura do dossel e caminhos preferenciais de escoamento; o SAR responde à umidade do sub-bosque e à exposição do solo após distúrbios, apoiando a restauração e o controle de erosão.

¹ É um retroespalhamento duplo: ocorre quando a onda de radar bate primeiro em uma superfície vertical (ex.: parede de prédio, tronco de árvore) e depois reflete em uma superfície horizontal condutora ou lisa (ex.: solo úmido, pavimento, superfície inundada), retornando ao sensor com alto ganho de sinal.

Em cidades, LiDAR pode ser utilizado para fornecer a geometria para modelos hidrológicos urbanos e para o diagnóstico de hotspots de erosão/sedimentação, enquanto o SAR oferece monitoramento frequente de enchentes e da efetividade de infraestrutura verde. Assim, decisões sobre conservação do solo, drenagem, mitigação de riscos e produtividade agrícola tornam-se mais precisas e oportunas (Anneli et al., 2021; (Wang et al., 2022).

Por fim, é importante reconhecer desafios e boas oportunidades de aplicações para o SAR e LiDAR. Em SAR, a rugosidade superficial, a geometria de observação e a vegetação afetam o sinal; a calibração com medidas de campo, a escolha do modelo (físico/empírico/híbrido) e o uso de polarimétrica adequadas são decisivos. Em LiDAR, a qualidade do classificador de pontos (separação terreno/vegetação), a densidade de pulsos e o método de interpolação do DEM influenciam métricas de relevo e, portanto, conclusões pedológicas. A literatura mostra que nem sempre um LiDAR “mais denso” apresenta um melhor resultado, o ganho depende da escala do processo que se quer explicar. Em ambos os casos, a integração de múltiplas fontes (SAR, LiDAR, óptico, topografia clássica) e modelagem com ML/assimilação de dados tende a oferecer os melhores resultados para diagnosticar e gerir solos em ambientes urbanos, agrícolas e florestais (Li et al., 2020). Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre as metodologias SAR e LiDAR, não como um a forma de “esgotar” a discussão, mas com intuito de chamar a atenção do leitor para estas duas metodologias de aquisição de dados/informações de solos no ambiente urbano, agrícola e em florestas.

Tabela 1. Comparação entre as tecnologias SAR e LiDAR em aplicações em solos do ambiente urbano, agrícola e em formações florestais.

Aspecto	SAR (Radar de Abertura Sintética)	LiDAR (Light Detection and Ranging)
Tipo de sensoramento	Ativo (emite sua própria radiação)	Ativo (emite pulsos de laser)
Princípio de funcionamento	Retroespalhamento de micro-ondas; sensível à constante dielétrica e rugosidade	Tempo de retorno de pulsos de laser; mede distância com alta precisão
Vantagens principais	<ul style="list-style-type: none"> - Independe de luz solar e atravessa nuvens; - Sensível à umidade do solo e estrutura superficial; - Ideal para monitoramento frequente e temporal; - Captura alterações hidrológicas e distúrbios (enchentes, queimadas, deslizamentos). 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisão na medição do relevo e microtopografia; - Captura estrutura da vegetação e do dossel; - Permite derivar índices de terreno (curvatura, fluxo específico); - Útil para planejamento de drenagem, erosão e conservação do solo.

Aspecto	SAR (Radar de Abertura Sintética)	LiDAR (Light Detection and Ranging)
Aplicações típicas	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativa de umidade do solo superficial em agricultura; - Monitoramento de enchentes e áreas urbanas; - Detecção de distúrbios em florestas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem de fluxo de água, erosão e infiltração; - Mapeamento microtopográfico; - Planejamento urbano e infraestrutura verde; - Estruturação de dossel florestal.
Algumas Limitações	<ul style="list-style-type: none"> - Sensível à rugosidade do solo e cobertura vegetal densa; - Interpretação depende de modelos físicos ou de aprendizado de máquina; - Geometria de observação pode gerar ambiguidades; - Necessita calibração com dados de campo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo relativamente alto para aquisição aérea ou terrestre; - Processamento intenso de dados; - Densidade de pontos nem sempre aumenta precisão útil; - Separação terreno/vegetação depende de classificadores adequados.
Complementaridade	SAR quantifica o estado hídrico que o LiDAR ajuda a interpretar pelo relevo.	LiDAR fornece relevo e microtopografia que explicam padrões de umidade e escoamento captados pelo SAR.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensoriamento remoto, em suas diferentes modalidades, constitui um conjunto de ferramentas indispensáveis para o estudo e gestão dos solos nos ambientes urbano, agrícola e florestal. O sensoriamento óptico oferece alta resolução espacial e espectral, permitindo identificar propriedades visíveis da superfície, como cor, matéria orgânica aparente, salinidade e padrões de uso e cobertura. Sua principal fragilidade está na dependência de iluminação solar e na suscetibilidade a nuvens e cobertura vegetal densa, o que limita a observação contínua.

O sensoriamento térmico (LST e balanço de energia) complementa o óptico ao fornecer informações sobre temperatura superficial e fluxos de calor, essenciais para estimar evapotranspiração, estresse hídrico e variações microclimáticas. No entanto, sua resolução espacial muitas vezes é inferior à dos sensores ópticos e requer correções atmosféricas precisas, além de integração com dados de campo para interpretação confiável.

Já o sensoriamento ativo com SAR e LiDAR amplia as possibilidades ao operar independentemente da luz solar e da cobertura de nuvens. O SAR é sensível à umidade do solo, rugosidade e estrutura da vegetação, mas apresenta complexidade de interpretação, sendo afetado por geometria de visada e interferências da vegetação. O LiDAR destaca-se pela capacidade de gerar modelos digitais de terreno e superfície de altíssima resolução, revelando a microtopografia que controla processos erosivos e hídricos; entretanto, seus custos operacionais e volume de dados são elevados.

A integração dessas tecnologias, apoiada por modelos físicos e algoritmos de aprendizado de máquina, potencializa a análise, superando limitações individuais e oferecendo uma visão multidimensional dos solos. Assim, a sinergia entre óptico, térmico, SAR e LiDAR consolida-se como abordagem robusta e adaptável, capaz de apoiar decisões estratégicas para manejo sustentável, mitigação de riscos e conservação em múltiplos contextos ambientais.

REFERÊNCIAS

Abdulraheem, M.I.; Zhang, W.; Li, S.; Moshayedi, A.J.; Farooque, A.A.; Hu, J. Avanço do Sensoriamento Remoto para Medições e Aplicações do Solo: Uma Revisão Abrangente. *Sustentabilidade* 2023, *15*, 15444. <https://doi.org/10.3390/su152115444>

Anela Mkhwenkwana, Trylee Nyasha Matongera, Ciara Blaauw, Onesimo Mutanga. A critical review on the applications of Sentinel satellite datasets for soil moisture assessment in crop production, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, V. 141, 2025, 104647, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104647>.

Anneli M. Ågren, Johannes Larson, Siddhartho Shekhar Paul, Hjalmar Laudon, William Lidberg, Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape, *Geoderma*, V. 404, 2021, 115280, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>.

Chen, X.; Louw, A.S.; Yunus, A.P.; Alsulamy, S.; Umarhadi, D.A.; Bhuiyan, M.A.H.; Avtar, R. Erosion and Drainage Development in Post-Landslide Settings Using UAV–LiDAR Data. *Soil Syst.* 2025, *9*, 42. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020042>

Ben-Dor, E.; Chabrillat, S.; Demattê, J.A.M.; Taylor, G.R.; Hill, J.; Whiting, M.L.; Somme, r S. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties, *Remote Sensing of Environment*. V. 113, Supplement 1, 2009, 38-555, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>.

Ettalbi, M.; Baghdadi, N.; Garambois, P.-A.; Bazzi, H.; Ferreira, E.; Zribi, M. Soil Moisture Retrieval in Bare Agricultural Areas Using Sentinel-1 Images. *Remote Sens.* 2023, *15*, 3502. <https://doi.org/10.3390/rs15143502>

Nimish, G.; Bharath, H.A.; Lalitha, A. Exploring temperature indices by deriving relationship between land surface temperature and urban landscape, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, V. 18, 2020, 100299, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100299>.

Heinemann, S.; Siegmann, B.; Thonfeld, F.; Muro, J.; Jedmowski, C.; Kemna, A.; Kraska, T.; Muller, O.; Schultz, J.; Udelhoven, T.; et al. Land Surface Temperature Retrieval for Agricultural Areas Using a Novel UAV Platform Equipped with a Thermal Infrared and Multispectral Sensor. *Remote Sens.* 2020, *12*, 1075. <https://doi.org/10.3390/rs12071075>

Jamali, F. S., Khaledi, S., & Razavian, M. T. (2021). Seasonal impact of urban parks on land surface temperature (LST) in semi-arid city of Tehran. *International Journal of Urban Sustainable Development*, *13*(2), 248–264. <https://doi.org/10.1080/19463138.2021.1872083>

Kaiser, E.A.; Rolim, S.B.A.; Grondona, A.E.B.; Hackmann, C.L.; de Marsillac Linn, R.; Käfer, P.S.; da Rocha, N.S.; Diaz, L.R. Spatiotemporal Influences of LULC Changes on Land Surface Temperature in Rapid Urbanization Area by Using Landsat-TM and TIRS Images. *Atmosphere* 2022, *13*, 460. <https://doi.org/10.3390/atmos13030460>

Lakra D, Pipil S, Srivastava PK, Singh SK, Gupta M and Prasad R (2025) Soil moisture retrieval over agricultural region through machine learning and sentinel 1 observations. *Front. Remote Sens.* 5:1513620. doi: 10.3389/frsen.2024.1513620

Li, Mark A. Nearing, Mary H. Nichols, Viktor O. Polyakov, D. Phillip Guertin, Michelle L. Cavanaugh. The effects of DEM interpolation on quantifying soil surface roughness using terrestrial LiDAR, *Soil and Tillage Research*, V. 198, 2020, 104520, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104520>.

Mallick J, Alsubih M, Ahmed M, Almesfer MK and Kahla NB (2022). Assessing the Spatiotemporal Heterogeneity of Terrestrial Temperature as a Proxy to Microclimate and Its Relationship With Urban Hydro-Biophysical Parameters. *Front. Ecol. Evol.* 10:878375. doi: 10.3389/fevo.2022.878375

Mardan, M.; Ahmadi, S. (2021). Soil moisture retrieval over agricultural fields through integration of synthetic aperture radar and optical images. *GIScience & Remote Sensing*, *58*(8), 1276–1299. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1974276>

Ranzhe, J.; Yuanyuan, S.; Xin, Z.; Nan L.; Xingming, Z.; Bingze, L.; Lei, Z.; Xiaokai, L.; Haiye, Y. Estimation of soil organic carbon by combining hyperspectral and radar remote sensing to reduce coupling effects of soil surface moisture and roughness, *Geoderma*, V. 444, 2024, 116874, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116874>.

Reiners, P.; Sobrino, J.; Kuenzer, C. Satellite-Derived Land Surface Temperature Dynamics in the Context of Global Change. A Review. *Remote Sens.* 2023, *15*, 1857. <https://doi.org/10.3390/rs15071857>

Roy, P.D.; Dey, S.; Bhogapurapu, N.; Chakraborty, S. Retrieval of Surface Soil Moisture at Field Scale Using Sentinel-1 SAR Data. *Sensors* 2025, 25, 3065. <https://doi.org/10.3390/s25103065>

Shukla, T.; Tang, W.; Trettin, C.C.; Chen, G.; Chen, S.; Allan, C. Quantification of Microtopography in Natural Ecosystems Using Close-Range Remote Sensing. *Remote Sens.* 2023, 15, 2387. <https://doi.org/10.3390/rs15092387>

Wang Z, Zhang C and Atkinson PM (2022) Combining SAR images with land cover products for rapid urban flood mapping. *Front. Environ. Sci.* 10:973192. doi: 10.3389/fenvs.2022.973192

Zhou, H., Ye, H., Wei, X., Zhang, Z., Wang, F., Qi, Y., et al. (2019). Comparative study on water extraction methods based on sentinel-1/2: A case study of small water body in Sri Lanka. *J. Univ. Chin. Acad. Sci.* 36 (6), 795–802.

Glécio Machado Siqueira
Marcos Gervasio Pereira
Lúcia Helena Cunha dos Anjos
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

SOLOS DO MARANHÃO

Gênese, Classificação e Pedometria

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Glécio Machado Siqueira
Marcos Gervasio Pereira
Lúcia Helena Cunha dos Anjos
Marlen Barros e Silva
Maria de Lourdes Mendonça-Santos

SOLOS DO MARANHÃO

Gênese, Classificação e Pedometria

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br