

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS -
CAMPUS OURO PRETO
LICENCIATURA EM GEOGRAFIA

Andressa Carvalho Damasceno

**MICROESTRUTURAS DE VERTISSOLOS EM LITOSSEQUÊNCIA
DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO
DAS ORIGENS E EVOLUÇÃO PEDOLÓGICA**

Ouro Preto

2024

ANDRESSA CARVALHO DAMASCENO

**MICROESTRUTURAS DE VERTISSOLOS EM LITOSSEQUÊNCIA
DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO
DAS ORIGENS E EVOLUÇÃO PEDOLÓGICA**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Geografia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, *campus* Ouro Preto, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciada em Geografia.
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Caroline Delpupo Souza

Ouro Preto

2024

D155m Damasceno, Andressa Carvalho.
Microestruturas de Vertissolos em uma litossequência do semiárido brasileiro [manuscrito] : contribuições ao estudo das origens e evolução pedológica / Andressa Carvalho Damasceno. – 2024.
38 f. : il.

Orientadora: Caroline Delpupo Souza.
Trabalho de Conclusão de Curso (licenciatura) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto, 2024.

1. Vertissolo. 2. Micromorfologia de solos. 3. Semiárido. I. Souza, Caroline Delpupo. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Preto. III. Título.

CDU: 631.4

Catálogo: Kelly Cristiane Santos Morais - CRB-6/3217



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Ouro Preto
Diretoria de Ensino
Docência de Área de Geografia
Rua Pandiá Calogeras, 898 - Bairro Bauxita - CEP 35400-000 - Ouro Preto - MG
- www.ifmg.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Andressa Carvalho Damasceno

MICROESTRUTURAS DE VERTISSOLOS EM LITOSSEQUÊNCIA DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DAS ORIGENS E EVOLUÇÃO PEDOLÓGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Geografia do Instituto Federal Minas Gerais – *Campus* Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Geografia.

Aprovado em: 19 de janeiro de 2024 pela banca examinadora:

Profa. Dra. Caroline Delpupo Souza (Orientadora, IFMG)

Prof. Dr. Alex de Carvalho (IFMG)

Profa. Sheila Aparecida Correia Furquim (UNIFESP)

Ouro Preto, 19 de fevereiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Caroline Delpupo Souza, Professora**, em 05/02/2024, às 11:38, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alex de Carvalho, Professor**, em 05/02/2024, às 13:39, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **SHEILA APARECIDA CORREIA FURQUIM, Usuário Externo**, em 09/02/2024, às 18:52, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1820085** e o código CRC **0808E5F6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, mas, especialmente, aos meus pais pelo apoio e compreensão pelos momentos de ausência, a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Caroline Delpupo Souza, por me indicar a direção a seguir e proporcionar inúmeras oportunidades de aprendizado; e à Prof.^a Sheila Furquim, docente da Universidade Federal de São Paulo e coordenadora do projeto do qual fiz parte. Sem este apoio, esse trabalho não seria possível. Por fim, agradeço ao querido Roger pelo apoio, amor e presença.

RESUMO

Presentes na região do Semiárido brasileiro, os Vertissolos são solos que apresentam horizonte vértico e são constituídos por material mineral e pequena variação textural ao longo do perfil. Apresentam uma consistência plástica devido à presença de argilas de alta atividade. Durante seu ciclo de umedecimento e secagem ocorrem os fenômenos de contração e expansão do solo, o qual conduz ao desenvolvimento de características como fendas, *slickensides* e *gilgai*. Este trabalho buscou contribuir para o avanço do conhecimento relacionado a gênese de dois perfis de Vertissolos na região do Semiárido brasileiro, formados a partir de diferentes litologias, localizados na região de Madalena, Ceará. Como base para esse estudo, foram empregadas as técnicas da Micromorfologia de solos. Sob uma óptica mais específica, foi possível também: i) identificar, descrever e analisar o significado genético de feições micromorfológicas presentes em seções finas; ii) comparar a mineralogia desses diferentes materiais de origem, ambos desenvolvidos na região do Semiárido brasileiro. A técnica utilizada na coleta das amostras indeformadas seguiu os conceitos de Castro e Cooper (2019), sendo coletadas amostras dos dois perfis após a abertura das trincheiras. Os solos coletados foram acomodados em caixas de transporte e enviados para a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, em Piracicaba/SP para posterior impregnação em lâminas delgadas no laboratório de Micromorfologia de solos da referida instituição. As análises das lâminas foram realizadas no Laboratório de Pedologia da CODAGEO - Coordenação de Geografia do IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, *campus* Ouro Preto. Após as descrições micromorfológicas e análises das lâminas, foram constatadas a elevada presença de minerais alterados, nódulos orgânicos e zonas de ferruginização, bem como os processos de ferruginização, carbonação e bissialitização. Assim, as análises micromorfológicas indicaram que a constituição mineralógica dos materiais de origem, os processos pedogenéticos encontrados e o clima do Semiárido brasileiro contribuíram para a formação dos Vertissolos na cidade de Madalena, Ceará.

Palavras-chave: Vertissolo; Micromorfologia de solos; Semiárido

ABSTRACT

Present in the Brazilian Semiarid region, Vertisols are soils that have a vertic horizon and are made up of mineral material and small textural variation along the profile. They have a plastic consistency due to the presence of high activity clays. During its moistening and drying cycle, the phenomena of soil contraction and expansion occur, which leads to the development of features such as cracks, slickensides and gilgai. This work sought to contribute to the advancement of knowledge related to the genesis of two Vertisol profiles in the Brazilian Semiarid region, formed from different lithologies, located in the region of Madalena, Ceará. As a basis for this study, soil micromorphology techniques were used. From a more specific perspective, it was also possible to: i) identify, describe and analyze the genetic meaning of micromorphological features present in thin sections; ii) compare the mineralogy of these different source materials, both developed in the Brazilian Semiarid region. The technique used to collect undisturbed samples followed the concepts of Castro and Cooper (2019), samples were collected from both profiles after opening the trenches. The collected soils were placed in transport boxes and sent to the “Luiz de Queiroz” College of Agriculture - ESALQ/USP, in Piracicaba/SP for subsequent impregnation in thin sections in the Soil Micromorphology laboratory of that institution. The slide analyzes were carried out at the Pedology Laboratory of CODAGEO - Geography Coordination of IFMG - Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais, Ouro Preto campus. After the micromorphological descriptions and analyzes of the slides, the high presence of altered minerals, organic nodules and zones of ferruginization were noted, as well as the processes of ferruginization, carbonation and bissialitization. Thus, micromorphological analyzes indicated that the mineralogical constitution of the source materials, the pedogenetic processes found and the Brazilian Semiarid climate contributed to the formation of Vertisols in the city of Madalena, Ceará.

Key words: Vertisol; Micromorphology of soil; Semiarid

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 12 |
| 2.1 Gênese e propriedades dos Vertissolos..... | 12 |
| 2.2 Clima e Pedogênese | 13 |
| 2.2.1 <i>Semiárido brasileiro</i> | 14 |
| 2.3 Litossequência | 16 |
| 2.4 Micromorfologia de solos..... | 17 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 18 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 23 |
| 4.1 Análises micromorfológicas | 23 |
| 4.2 Processos pedogenéticos..... | 31 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 34 |
| REFERÊNCIAS | 35 |

1 INTRODUÇÃO

Há mais de um século a teoria sobre a importância do clima na formação do solo e na evolução da paisagem é aceita. Para o desenvolvimento dos padrões de uma determinada região com relação ao solo, o clima é considerado um dos mais relevantes; é ele quem fornece dois dos componentes mais significativos que afetam os processos de gênese do solo: água e temperatura. A partir da compreensão da importância do clima como um fator de formação do solo, foi possível também compreender que as diferentes intensidades de intemperismo dão origem a solos distintos.

As elevadas temperaturas, chuvas concentradas e irregulares e a intensa radiação solar são elementos climáticos que caracterizam o clima semiárido do nordeste brasileiro. Para além, existe também a evapotranspiração, uma importante variável do ciclo hidrológico, cuja característica é a transferência de água presente no solo e plantas, para a atmosfera (SEDIYAMA, 1998). Em algumas áreas do semiárido a precipitação média não ultrapassa os 400 mm anuais, porém, a sua capacidade de evapotranspiração pode chegar a 2.500 mm ano (MONTENGRO; MONTENEGRO, 2012). Esse clima é propício à formação de Vertissolos, visto que a baixa precipitação anual e a elevada evapotranspiração induzem na formação de fendas no solo. Além disso, as características climáticas do semiárido auxiliam também na estabilidade de argilominerais expansivos e, em conjunto com a distribuição irregular de chuvas, favorecem os processos de contração e expansão do solo (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000).

Vertissolos são solos que apresentam horizonte vértico e são constituídos por material mineral e pequena variação textural ao longo do perfil (SiBCS, 2013). São de consistência plástica e pegajosa devido à presença de argilas de alta atividade. O ciclo de umedecimento e secagem ocasiona no solo o fenômeno de contração e expansão, o qual conduz ao desenvolvimento de características como fendas, *slickensides* e *gilgai*. Se apresentam como solos desenvolvidos em ambientes de bacias sedimentares ou cujos sedimentos tenham predominância de materiais de textura fina, com elevados teores de cálcio e magnésio, ou ainda, de rochas básicas ricas em cálcio e magnésio. Estão distribuídos nos mais diferentes tipos de clima, de úmidos aos mais secos, tendo grande expressão nas bacias sedimentares localizadas na região semiárida do Nordeste brasileiro. Em relação ao relevo, os Vertissolos distribuem-se em áreas aplanadas a pouco movimentadas e, menos frequentemente, em áreas movimentadas, tais como encostas e topos de serras ou serrotes (SiBCS, 2013).

Conforme indicado por Grim (1962), a quantidade de água é o fator que interage entre a estrutura e o comportamento do solo. A variação da quantidade de água é que possibilita a expansão e contração dessas argilas, apresentando mudança de volume quando o teor de água é elevado.

Em relação às suas cores, os Vertissolos apresentam cores que podem ser escuras, acinzentadas, amareladas ou avermelhadas, nos casos de menor acúmulo de matéria orgânica. São solos de alta CTC, alta saturação por bases (> 50 %) e altos teores de cálcio e magnésio. Em relação a seus nutrientes, são solos de alta fertilidade e propícios para o plantio, sendo suas características de expansão e contração um entrave para sua utilização. Fisicamente, quando úmidos, têm a permeabilidade à água muito lenta. As fendas verticais no período seco atingem, no mínimo, 50 cm de profundidade (SiBCS, 2013).

Como unidade morfoclimática, o nordeste brasileiro está sob o domínio das depressões intermontanas e interplanálticas, com áreas subequatorial e tropical semiárida (AB'SABER, 2003). O Semiárido brasileiro estende-se por oito estados da região nordeste e pelo norte de Minas Gerais. É uma região que se caracteriza pela baixa pluviosidade - abaixo de 800 mm anual - e alta taxa de evapotranspiração (BRASIL, 2010). Com clima tropical quente semiárido, a região de Madalena é caracterizada por temperaturas que variam de 26 °C a 28 °C, com pluviosidade abaixo dos 700 mm anuais (IPECE, 2012).

Como ferramenta primordial para a produção desse trabalho, a Micromorfologia é o ramo da ciência do solo e da terra que descreve, mede e interpreta os materiais pedológicos na escala microscópica e submicroscópica (BULLOCK *et al.*, 1985; STOOPS, 2003). Possibilita a observação dos constituintes sólidos desses materiais quanto à sua natureza e seus arranjos espaciais, como os poros visíveis nessa escala, utilizando equipamentos ópticos e lâminas delgadas previamente produzidas (CASTRO, 1999).

O conceito de estrutura mais difundido atualmente é o de Bullock *et al.* (1985) que a considera como uma constituição física de um solo, expressa pelo seu tamanho, forma e arranjo das partículas sólidas e poros, formando ou não agregados. Portanto, microestrutura diz respeito à forma de arranjo dos constituintes dos solos contidas na macroestrutura, que serão analisadas com aumento > 5x em microscópio óptico.

Em todo tipo de solo, as macros e a microestruturas são importantes para definir as propriedades e o comportamento do mesmo, sendo relevante conhecer o papel de cada uma delas.

O estudo da gênese e evolução tem como característica a pesquisa sobre os processos e mecanismos genéticos-evolutivos dos solos a fim de priorizar o reconhecimento de indicadores macro e micromorfológicos dos processos pedogenéticos atuantes. Esse reconhecimento se dá com a identificação dos constituintes e de suas formas de organização, bem como sua hierarquia e cronologia. Através dos mecanismos de perda, adição, translocação e transferência é possível reconhecer o aparecimento ou desaparecimento de microestruturas e feições pedológicas daquele solo (CASTRO; COOPER, 2019).

Ainda segundo Castro e Cooper (2019), as microestruturas apresentam formas equivalentes àquelas dos agregados maiores observados em campo. Sendo assim, a observação das transições de uma zona para outra ou de uma feição para seu entorno são extremamente importantes e devem ser feitas com riqueza de detalhes, uma vez que podem revelar o processo evolutivo das microestruturas (EMBRAPA, 2017) e, a partir delas, entender o funcionamento do solo na escala de paisagem.

Considerado o precursor da Micromorfologia no estudo dos solos e intitulada inicialmente por ele como Micropedologia, Kubiena (1938) cita a importância do uso da microscopia aplicada à Pedologia pela necessidade de examinar solos em condições ainda pouco exploradas. Apesar de sua importância no estudo dos solos, não se deve considerar a micromorfologia de solo uma disciplina isolada e, sim, como uma técnica que, utilizada em conjunto com outras fontes de informação, pode fornecer dados sobre a gênese, evolução e funcionamento dos solos (COOPER *et al.*, 2017).

Segundo Chauvel (1979) *apud* Castro *et al.* (2019), os objetivos fundamentais da Micromorfologia de solos são: identificar os constituintes dos solos nas suas diferentes frações, identificar as relações existentes entre esses constituintes (tipos de organização, hierarquia e cronologia das organizações) e formular hipóteses ou demonstrações acerca da dinâmica genética e evolutiva dos solos na tentativa de esclarecer as controvérsias sobre sua origem, evolução e comportamento.

O estudo dos Vertissolos é importante não só para a compreensão de sua gênese, mas também para o entendimento de seu comportamento, dinâmica, uso e manejo. A micromorfologia foi uma ferramenta fundamental na elaboração desse estudo. Assim, esse trabalho buscou contribuir para o avanço do conhecimento acerca da gênese de dois perfis de Vertissolos na região do Semiárido brasileiro sob diferentes litologias, localizados na região de Madalena, Ceará. Como

base para esse estudo, foram empregadas as técnicas da Micromorfologia de solos. Sob uma ótica mais específica, pretendeu-se também: i) identificar, descrever e analisar o significado genético de feições micromorfológicas presentes em seções finas; ii) comparar a mineralogia desses diferentes materiais de origem, ambos desenvolvidos na região do Semiárido brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gênese e propriedades dos Vertissolos

Segundo Oliveira *et al.* (2021), o solo é por excelência um componente físico-natural de síntese, que possui na sua formação e evolução a participação de diversos outros componentes que constituem a paisagem. Como complemento a essa informação, Bigarella *et al.* (1996) destaca que os solos são constituídos direta e indiretamente de produtos de intemperização das rochas. De maneira secundária, estariam em ação organismos e detritos orgânicos decompostos da cobertura vegetal. Atualmente, os solos têm sido estudados em seus múltiplos aspectos.

Para Mermut *et al.* (1996) *apud* Barbosa (2017), os Vertissolos se desenvolvem em diferentes materiais de origem, abrangendo desde materiais alóctones a autóctones. Dentre estes, os sedimentos alóctones pelíticos são mais comuns, apresentando áreas de ocupação mais extensas que os autóctones, sendo encontrados principalmente nas partes mais baixas da paisagem.

Os Vertissolos são solos minerais com séria restrição temporária à percolação de água, com 30 % ou mais de argila ao longo do perfil, que apresentam pronunciada mudança de volume, de acordo com a variação do teor de umidade. São solos eutróficos, com alta saturação de base, ricos em K, Mg e Ca. Devido a essa condição, são solos excelentes do ponto de vista da sua utilização na agronomia, tendo as argilas de alta atividade um dos empecilhos para esse manejo. Têm como características macromorfológicas a presença de fendas de retração largas e profundas, que se abrem desde o topo do perfil, nos períodos secos, superfícies de fricção (*slickensides*) (OLIVEIRA *et al.*, 1992).

Como particularidade desse solo, existe a presença de *gilgais*, microrrelevos desenvolvidos em regiões com a alternância de estações úmidas e secas, característica também de formação desse tipo de solo (BIGARELLA *et al.* 1996). Ainda segundo o autor, os *slickensides* são “superfícies de fricção polidas e estriadas, provenientes da movimentação de camadas ou estruturas, umas sobre as outras. São comuns em solos com os atributos característicos dos Vertissolos”. No geral, os *slickensides* são mais frequentes em Vertissolos desenvolvidos em

regiões com períodos secos e úmidos mais marcantes, o que promove um fendilhamento mais profundo no solo. Essas fendas promovem o desenvolvimento de unidades estruturais em profundidade que, por sua vez, irão sofrer maior sobrecarga da massa de solo úmida, limitando sua expansão vertical. Assim, as forças de tensão são aliviadas pelo movimento lateral, no plano de menor resistência ao cisalhamento (BARBOSA, 2017). No Brasil, a ocorrência de Vertissolos está intimamente relacionada à presença de material de origem derivado de calcários, sedimentos argilosos ricos em cálcio e magnésio e rochas básicas (OLIVEIRA *et al.*, 1992). No Semiárido brasileiro, os Vertissolos ocorrem principalmente sobre depósitos aluviais e rochas metamórficas de granulometria fina, como calcários, folhelhos, argilitos e xistos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000).

Diversos fatores influenciam nas propriedades mineralógicas dos Vertissolos, sendo eles o material de origem, o clima, o relevo e o tempo de evolução do solo. A diferença entre o nível de intensidade em que estes fatores de formação atuam na evolução do solo é responsável pela sua grande variabilidade no mundo (COULOMBE *et al.*, 1996).

Os Vertissolos apresentam três subordens, das quais duas estão descritas nesse estudo: Vertissolos Ebânicos, com caráter ebânico na maior parte dos horizontes dentro de 100 cm da superfície e Vertissolos Háplicos, que não se enquadram nas classes de subordens anteriores (SIBCS, 2013).

2.2 Clima e Pedogênese

A formação do solo se dá a partir da interação de cinco agentes, sendo estes denominados de fatores de formação, a saber: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo (JENNY, 1941). Dentre os quatro fatores que incidem sobre o material de origem, o clima é o mais influente, pois ele determina o tipo e a intensidade do intemperismo. Dentro do clima, a temperatura e a pluviosidade são os condicionantes fundamentais na formação de um solo (BRADY *et al.*, 2013).

A água é essencial a todas as reações químicas que envolvem o intemperismo, mas sua percolação é relevante para que ocorra o transporte de materiais solúveis de um horizonte para outro, bem como para as águas de drenagem. No Brasil, a quantidade pluviométrica recebe notória importância no desenvolvimento dos solos. A quantidade de água que atinge sua superfície, penetra, transita e se mantém nele é fator determinante para que haja a diferenciação dos horizontes

do solo. De certa maneira, o regime hídrico de uma determinada região fornece indicações relevantes sobre seu aspecto (OLIVEIRA, 2011).

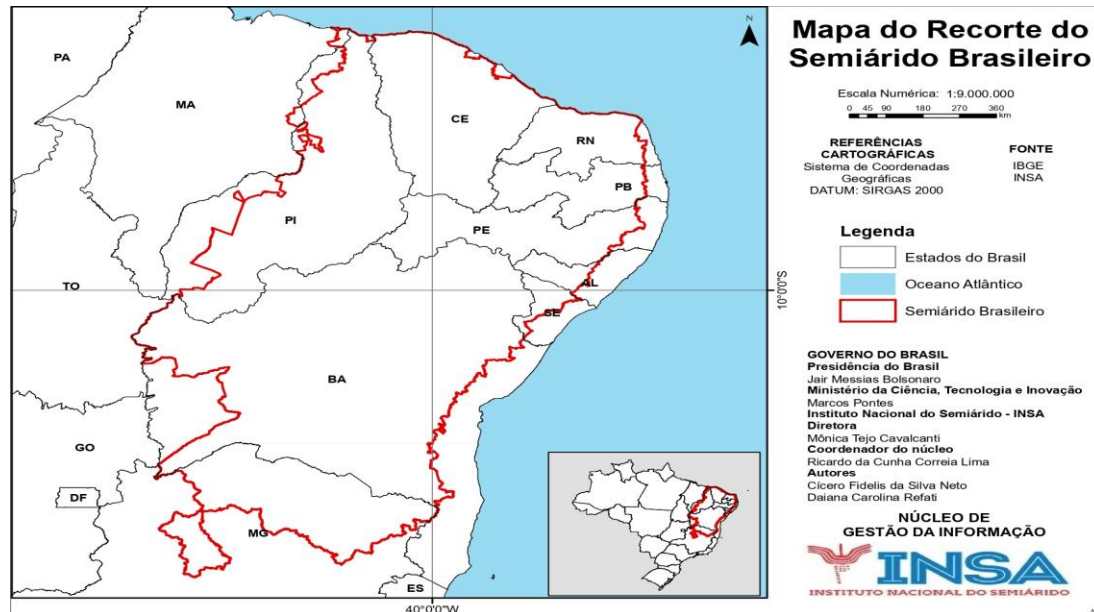
Para além do regime hídrico e pluviosidade, o semiárido brasileiro possui uma outra relevante característica no que diz respeito a formação de solo: a evapotranspiração. No semiárido, seus valores podem atingir mais que o dobro dos valores das precipitações pluviiais anuais, sendo determinante na manutenção de bases e sais do solo e na formação de argilominerais, tanto do grupo das esmectitas quanto das caulinitas (ARAUJO FILHO, *et al.*,2022).

Por sua vez, a temperatura tem influência direta na velocidade e intensidade em que tais fenômenos ocorrem. A elevação da temperatura aumenta a rapidez da ocorrência dos fenômenos químicos. A temperatura do solo tem ligação direta com a quantidade de radiação solar que o atinge e a duração desse período de radiação (OLIVEIRA, 2011). Além da influência que exerce na rapidez das reações químicas, a temperatura de um solo tem relação indireta com alguns atributos, como suas cores. Como exemplo, as cores mais avermelhadas são mais comuns em solos de regiões de clima tropical que em locais de temperaturas mais baixas (BRADY *et al.*, 2013).

2.2.1 Semiárido brasileiro

A região semiárida do nordeste brasileiro (FIGURA 1) comporta 1.477 municípios com, aproximadamente 30,3 milhões de habitantes, segundo as estimativas de população do IBGE para 2022. A região nordeste do Brasil equivale a 70,3% do Semiárido brasileiro, que se localiza na porção central dessa região, abrangendo os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte do norte do Estado de Minas Gerais, já na porção sudeste do país (SILVA *et al.* 2010).

Figura 1 - Estados brasileiros que compreendem a região do semiárido



Fonte: Instituto Nacional do Semiárido – INSA (BRASIL, 2023).

Segundo Embrapa Semiárido (2007), o clima da região apresenta forte insolação, temperaturas relativamente altas e baixa capacidade pluviométrica, com chuvas irregulares e concentradas em um curto período, três meses em média, com baixa capacidade de reserva de água em mananciais. Essa região tem como características as fortes incidências solares, temperaturas altas e regime de chuvas marcado pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações em um curto período, em média, de três a quatro meses, apresentando volumes de água insuficientes em seus mananciais para atendimento das necessidades da população. Corroborando com essa afirmação, Ab'Saber (2003) menciona que são comuns as irregularidades de chuvas na região Nordeste do Brasil, com eventuais anos secos. Porém, não raro, essas chuvas são volumosas com capacidade de causar inundações.

De acordo com Silva (2010), o Semiárido brasileiro é um dos mais povoados do mundo e, em função das adversidades climáticas, associadas aos outros fatores históricos, geográficos e políticos possui a parcela populacional mais pobre do país. É uma região de ocupação antiga baseada em pastoreio e com ações humanas ainda voltadas para utilização de rios e brejos. Nessas áreas, especificamente, a vegetação e solos sofrem com fortes degradações, diminuindo sua utilização agrária (AB'SABER, 2003).

Em relação à sua geologia, Jacomine (1996) dividiu a região em três áreas conforme a natureza dos materiais de origem: áreas do cristalino, áreas do cristalino recobertas por materiais mais ou menos arenosos e áreas sedimentares. O relevo da região é muito variável, o que contribui para o elevado número de grandes unidades de paisagens citadas. Sua variação altimétrica fica, em média, entre 400 m e 500 m, podendo atingir 1.000 m.

A respeito dos solos, Jacomine (1996) revela que na região semiárida existe uma grande diversidade de litologias e material originário, relevo e regime de umidade do solo. Estes fatores dão como resultados a presença de diversas classes de solos, as quais apresentam diferentes feições morfológicas e posições na paisagem. As principais classes de solo que ocorrem no Semiárido brasileiro são os Latossolos, Argilossolos, Neossolos, Vertissolos, Luvisolos, Planossolos e os Cambissolos.

A vegetação do Semiárido brasileiro é adaptada às condições de aridez e de fisionomia variada, a Caatinga. Seu ecossistema é considerado relevante do ponto de vista biológico, sendo sua distribuição totalmente restrita ao território brasileiro. Estudos recentes, contemplando levantamentos da flora e da fauna, mostram que a caatinga possui considerável número de espécies endêmicas e, por isso, deve ser considerada um patrimônio biológico de valor incalculável (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2010).

2.3 Litossequência

Através dos processos geológicos, inúmeros materiais de origem foram trazidos à superfície da Terra. Por meio dos materiais de origem se dá a formação do solo e nele estará contida as suas características herdadas desses materiais. A presença de minerais de argila em alguns materiais de origem, afeta substancialmente o tipo de solo a ser formado (BRADY; WEIL, 2013).

Os diferentes materiais de origem são de grande relevância para a compreensão da formação dos solos do Semiárido, dada sua grande diversidade litológica. Segundo Jacomine (1996), destacam-se na região: áreas do cristalino, com predomínio de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos e áreas do cristalino recoberto por materiais arenosos ou argilosos; áreas sedimentares com sedimentos aluviais recentes.

Quando se diz respeito ao estudo da evolução de um solo, a litossequência assume importante papel. É possível, através da litossequência, compreender as características marcantes que o material de origem deixou impresso na origem de um determinado tipo de solo (RESENDE

et al., 2007).

Dito de outro modo, a litossequência pode ser entendida como solos que possuem relação entre si, porém, algumas de suas propriedades se diferenciam, principalmente no que tange aos diferentes materiais de origem (LEPSCH, 2011). O entendimento dessas sequências de solos, o estudo da influência dos fatores de formação e a compreensão dos processos pedogenéticos têm se mostrado uma forma bastante eficiente para a investigação das causas das diferenciações pedológicas.

2.4 Micromorfologia de solos

A utilização da microscopia na Pedologia ganhou notoriedade com a publicação do livro *Micropedology*, escrito por Kubiena em 1938. Nessa publicação, foi apresentado o primeiro sistema de descrição de seções delgadas de solos, bem como o primeiro manual com instruções sobre como as amostras indeformadas devem ser coletadas e preparadas. Após essa publicação, a Micromorfologia de solos vem ganhando novos adeptos, com diversas obras publicadas. Esses autores contribuíram significativamente para a evolução da Micromorfologia aplicada no estudo dos solos. No Brasil, destaca-se a obra publicada por Castro e Cooper (2019), sendo referência para as descrições morfológicas na língua portuguesa (OLIVEIRA, *et al.*, 2021).

Novas informações sobre ambiente e paisagem vem contribuindo ao longo dos anos na classificação e estudo dos solos no país. A micromorfologia tem sido de grande importância nessas discussões. Tais abordagens analíticas têm permitido ampliar a compreensão para além do perfil, compreendendo outros aspectos da paisagem em que ele está inserido, tanto atual quanto pretérito (OLIVEIRA, *et al.* 2021). Corroborando com o objetivo deste trabalho, Stoops *et al.* (2010) afirma que o uso da micromorfologia nos estudos das propriedades vérticas irá fornecer informações significativas e confiáveis acerca de sua gênese e evolução.

Diferentes profissionais utilizam a micromorfologia como base para estudo. Dentre eles estão os pedólogos(as), geólogos (as), geógrafos (as), geomorfólogos (as), geoquímicos (as), arqueólogos (as), físicos (as) de solo, áreas que necessitam das técnicas microscópicas para explorar os materiais de seus campos de interesse (COOPER *et al.*, 2017). Segundo Filizola (2006), é possível considerar que a observação micromorfológica seja um *zoom* na organização da cobertura pedológica. Essa técnica de estudo utiliza amostras não deformadas de solo e permite, com a ajuda de técnicas microscópicas e ultramicroscópicas, identificar os constituintes

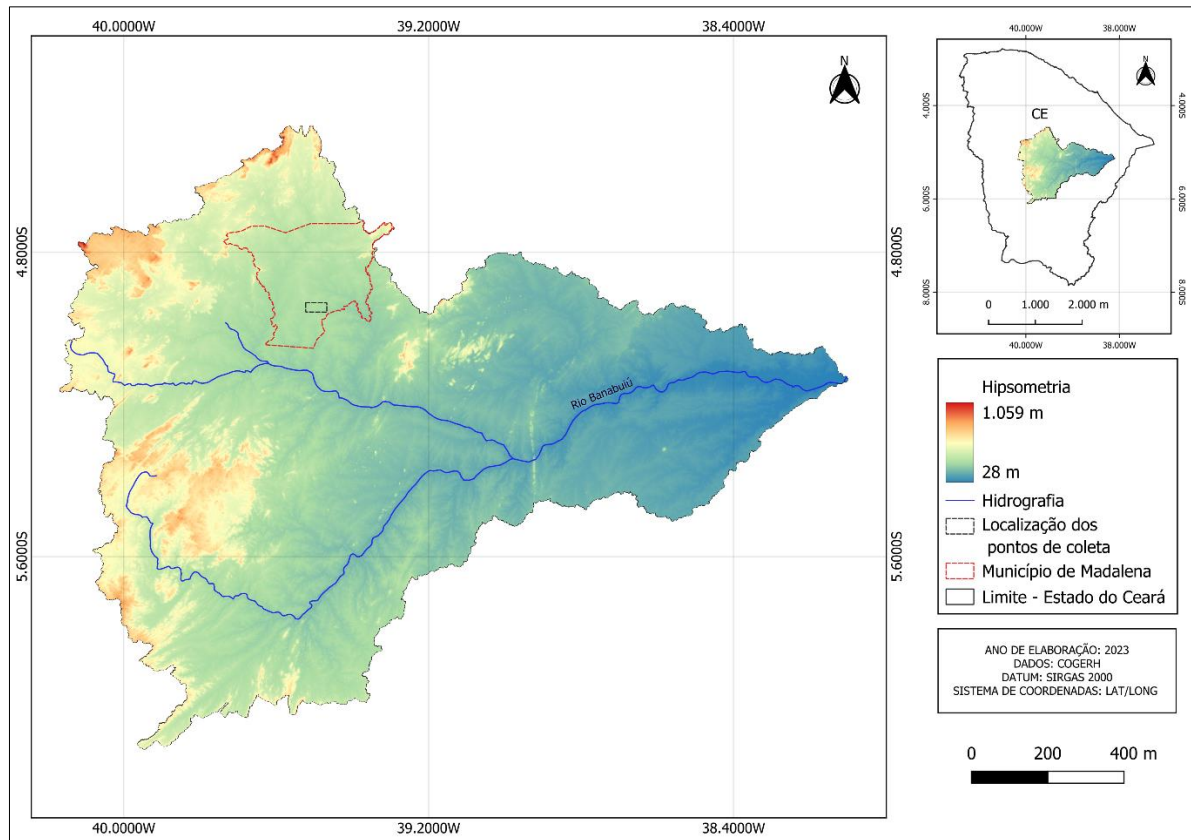
elementares (plasma, esqueleto, poros etc.) e as diversas associações destes, além de permitir identificar suas relações mútuas no espaço e, muitas vezes, no tempo.

No que diz respeito ao tipo de amostra utilizada, Cooper *et al.* (2017) reforçam a importância que o material amostrado esteja com sua estrutura conservada, ou seja, não deformada pela coleta, sendo, assim, útil no esclarecimento das hipóteses pedológicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Madalena está situado na bacia hidrográfica do rio Banabuiú (FIGURA 2). Possui também em suas proximidades os rios Quixeramobim, Pirabiru e o rio das Cachorras, importantes rios para a região. Essa bacia tem uma área de drenagem de 19.316 km², correspondente a 13,37% do território cearense, sendo o Rio Banabuiú o principal tributário do Rio Jaguaribe. Tem como afluentes pela margem esquerda, os Rios Patu, Quixeramobim e Sitiá e pela margem direita apenas o riacho Livramento. A bacia hidrográfica do rio Banabuiú é composta por 15 municípios e apresenta uma capacidade de acumulação de águas superficiais de 2.760.549.943 bilhões de m³, num total de 19 açudes públicos gerenciados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH, 2023).

Figura 2 - Mapa hipsométrico com a localização dos perfis na bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú



Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

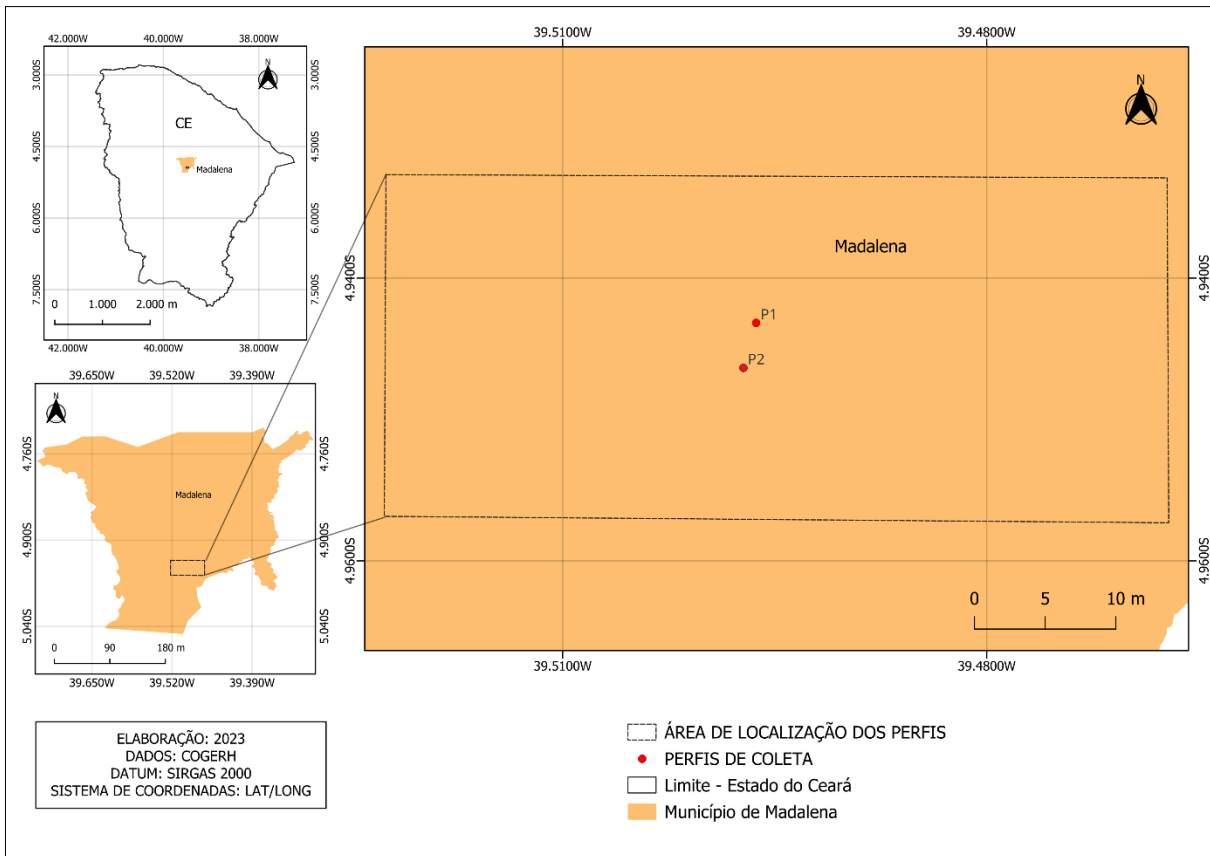
A data de criação do município de Madalena foi 23 de dezembro de 1986, suas origens são recentes e têm como referência a Fazenda Teotônio na qual se situa o açude de igual nome. Essa Fazenda, considerada modelo, pertenceu inicialmente à firma Plínio Câmara Vieira Ltda e ao Grupo Edson Queiroz. A partir daí, se deu a evolução política da povoação, formada em torno desse empreendimento, elevando-se à categoria de vila conforme Lei nº 1.153, de 22 de novembro de 1951. Sua elevação à categoria de município provém da Lei nº 6.376, de 12 de julho de 1963. Suprimido conforme lei nº 8.339, de 14 de dezembro de 1965, antes de sua instalação e restaurado segundo Lei nº 11.724, de 23 de dezembro de 1986, tendo sido instalado a 1º de janeiro de 1989. Segundo censo realizado em 2022, a população de Madalena é de 16.896 habitantes (IBGE, 2022).

Os perfis selecionados e descritos neste trabalho correspondem à referida cidade, com suas posições locais conforme mostra a Figura 3. Ambos os perfis se encontram na mesma compartimentação geomorfológica, a Depressão Sertaneja, com precipitação anual e altimetria bastante semelhantes. Se encontram na mesma posição topográfica (topo plana) tanto

regionalmente quanto localmente, sobre pequenas colinas sustentadas por rochas cristalinas. A vegetação primária é da caatinga hiperxerófila.

No maciço residual que sobressai na região, encontra-se a sede do município. Em relação aos solos encontrados na região, destacam-se os bruno não-cálcicos, solos litólicos e algumas manchas de Vertissolos. No que se refere à vegetação, há porções onde a caatinga é mais arbustiva e densa e na região dos Vertissolos há a predominância de floresta caducifólia espinhosa ou caatinga arbórea. o substrato litológico é de rochas cristalinas, granitos, gnaisses e migmatitos do pré-cambriano. Sobre estes, há pequenas manchas de coberturas coluvionares conglomeráticas e de depósitos aluvionares ao longo dos leitos das drenagens mais importantes (IPLANCE, 1997).

Figura 3 - Mapa de localização da cidade de Madalena (CE) e a área de coleta dos Perfis 1 e 2



Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

Embora possuam características específicas análogas, suas litologias e classificações se diferem, conforme exposto no quadro 1, a seguir. Estavam presentes nessa viagem os pesquisadores

Prof.º José Coelho, Prof.ª Caroline Delpupo, Prof.ª Grace Alves, Prof.º Valdomiro Souza, a coordenadora do projeto Prof.ª Sheila Furquim e os estudantes de IC Beatriz Bandeira e Matheus Figueiredo. A autora desse trabalho não esteve presente em campo, bem como nas coletas dos solos.

Quadro 1 – Informações gerais sobre os perfis de solos estudados

| Perfil | Localização | Coordenadas | Classificação do solo WRB, 2022 | Unidade Geomorfológica | Elevação | Material de origem |
|----------|---------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------|--------------------|
| Perfil 1 | Madalena (CE) | 04°56'35.42" S 39°29'46.71" W | Vertissolo Ebânico Órtico | Depressão sertaneja | 313 m | Anfibolito |
| Perfil 2 | Madalena (CE) | 04°56'46.88" S 39°29'49.96" W | Vertissolo Háplico Órtico | Depressão Sertaneja | 309 m | Gnaisse |

Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023), adaptado de Relatório parcial FAPESP (2023).

A técnica utilizada na coleta dessas amostras seguiu os conceitos de Castro e Cooper (2019), porém, ao fazerem a retirada das porções escolhidas para a análise do solo, os pesquisadores presentes constataram que o mesmo se encontrava endurecido e de difícil manejo, causando lesões nas mãos dos que fizeram sua coleta. Assim, algumas amostras não foram retiradas em consonância com as técnicas indicadas pelos referidos autores. Para eles, as coletas devem preservar as condições originais da amostra, de modo a impedir que sofram deformidades e o objetivo da pesquisa a ser realizada é primordial para determinar o número de amostras a serem coletadas, onde coletar, a orientação da amostra e a técnica a ser empregada na amostragem. Apesar da dificuldade em manuseá-lo, os pesquisadores conseguiram retirar as amostras, preservando suas principais características.

Como parte inicial do trabalho, a coleta dos Vertissolos se deu da seguinte forma: após selecionados os locais (FIGURA 4), deu-se a abertura de trincheiras para exposição dos perfis (FIGURA 5). Posteriormente, foram feitos entalhes no solo com uma faca e inserido o molde, onde os cortes estavam indicados por flechas, e foram até o limite com o fundo da caixa. As caixas de coleta foram encaixadas sobre os monólitos esculpidos e forçadas para se desprender, fazendo uma alavanca ao fundo com a faca. Parte de algumas amostras se quebraram durante esse processo de retirada do perfil. Ao término de cada coleta, as amostras foram envoltas com papel-filme até que

estivessem firmes e acomodadas em caixas de transporte, com jornal e plástico bolha entre as amostras.

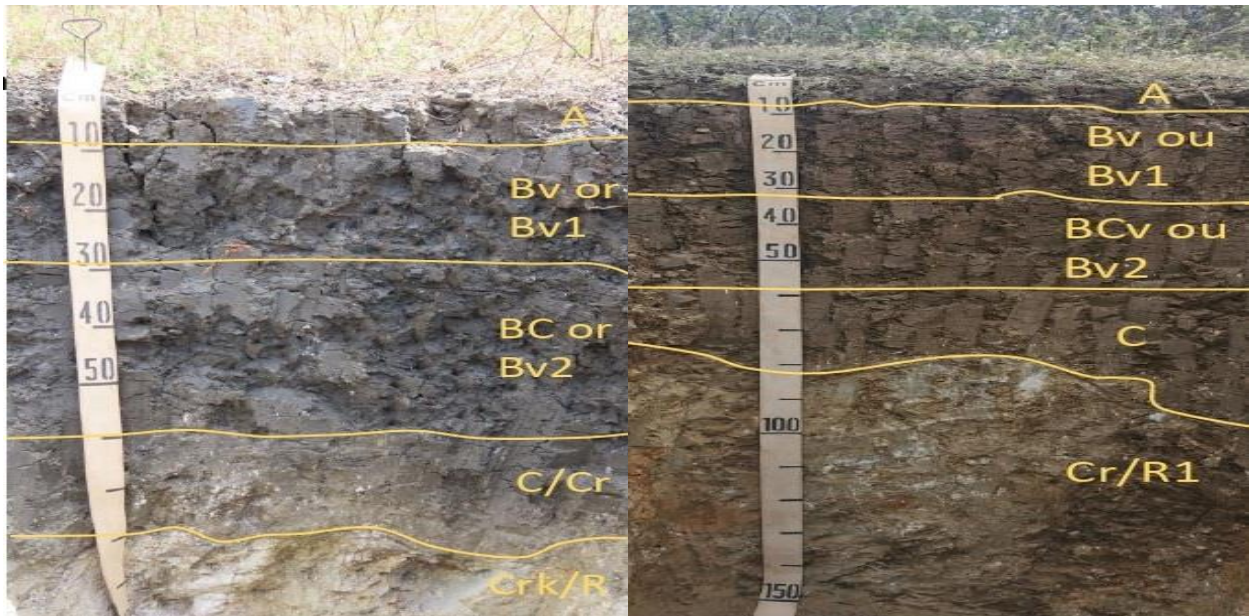
Figura 4 - Aspectos gerais do relevo e vegetação das áreas de estudos - Madalena (CE)



Fonte: Relatório parcial FAPESP (2023).

Legenda: à esquerda: Perfil 1; à direita: Perfil 2.

Figura 5 – Perfis de solos utilizados neste estudo, com a definição dos horizontes pedogenéticos.



Fonte: Relatório parcial FAPESP (2023).

Legenda: à esquerda: Perfil 1; à direita: Perfil 2.

Os materiais utilizados nas coletas das amostras foram: caderneta de campo com plano de amostragem de coleta; caixas de papel cartão resistentes, porém dobráveis; caneta para identificar as amostras; fita métrica para medir as profundidades das coletas; tesoura comum; espátula pequena para auxiliar a esculpir os monólitos coletados; faca de ponta; grampeador utilizado para grampear as bordas dobradas da caixa de coleta; filme plástico para embrulhar as amostras; plástico bolha para protegê-las durante o transporte e caixa de transporte.

Cada amostra foi interpretada e descrita pelos pesquisadores responsáveis por essas coletas, colocando-as acomodadas em caixas de transporte. Posteriormente, as mesmas foram enviadas à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, *campus* da USP - Universidade de São Paulo, na cidade de Piracicaba/SP, aos cuidados da técnica de laboratório Sônia Aparecida Moraes e da pós-graduanda Amanda Reis, responsáveis pela laminação dessas amostras, produzidas no Laboratório de Micromorfologia de Solos, do Departamento de Ciência do Solo da referida instituição.

As caracterizações micromorfológicas das lâminas delgadas indeformadas foram realizadas em seções finas de solos selecionados através de Microscópio Petrográfico Trinocular Opton, disponível no Laboratório de Pedologia da CODAGEO - Coordenação de Geografia do IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Minas Gerais, *campus* Ouro Preto. Os termos utilizados na descrição micromorfológica seguiram os preceitos propostos por Stoops (2003); Stoops *et al.* (2010); e as mensurações segundo propostas de Castro e Cooper (2019). Tais parâmetros foram conduzidos segundo alguns princípios básicos: (i) descrição e identificação visual do componente; (ii) comparação visual do componente com padrões de referência; (iii) medições diretas do componente: abundância, cor, forma e variabilidade (BULLOCK *et al.*, 1985).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises micromorfológicas

O resumo da descrição micromorfológica de ambos os perfis se encontra disponível nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Perfil 1: Vertissolo Ebânico Órtico.

| Horizonte | Fundo Matricial | | | Materiais Orgânicos | Microestrutura e porosidade | Pedofeições |
|----------------|--|---|---|---|---|---|
| | Material Grosso | Micromassa | $c/f_{2\mu m}$ Distribuição Relativa | | | |
| Bv | Grande diversidade mineral, com presença de biotita, quartzo, hornblenda e calcita; presença de areia fina. | Coloração bruno-acinzentada, com birrefringência. | Porfírica | Nódulos orgânicos em tamanhos diversos, envoltos pela micromassa. | Blocos angulares e subangulares; poros planares retilíneos e curvos, bem acomodados. | Agregados de hiporrevestimento de material orgânico. |
| BC | Grande diversidade mineral, com presença de biotita, quartzo, mica, com destaque para quantidade de hornblenda. | Coloração bruno-acinzentada com birrefringência. | Porfírica | Nódulos orgânicos amorfos, ameboidal (raízes) e arredondados, estes envoltos pela micromassa. | Blocos angulares e subangulares, com alguns subarredondados; poros planares retilíneos e poros em rede. | Agregados de hiporrevestimento de material orgânico com zonas de ferruginização; minerais com alto grau de alteração. |
| CrK/Rce | Forte presença de grãos de quartzo; hornblenda e ausência de biotita; predominância de areia grossa. | Coloração bruno-amarelado | Porfírica-gefúrica | Grande quantidade de nódulos orgânicos amorfos e arredondados. | Blocos angulares e subangulares, com poros planares retilíneos (predominância) e curvados. | Forte presença de nódulos orgânicos em toda superfície, possível transformação em húmus. |
| CrK/Rb | Forte presença de carbonatos de cálcio (calcita) e grãos de quartzo; ausência de hornblenda e biotita; areia grossa. | Coloração bruno-amarelado escuro com birrefringência. | Gefúrica-porfírica | Pequena quantidade de nódulos orgânicos amorfos. | Blocos angulares e subangulares, com poros planares retilíneos em baixa quantidade. | Alta intemperização de minerais; processo de carbonação. |

Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

Quadro 3 – Perfil 2: Vertissolo Háptico Órtico.

| Horizonte | Fundo Matricial | | | Materiais Orgânicos | Microestrutura e porosidade | Pedofeições |
|------------|--|-----------------------------|---|---|--|--|
| | Material Grosso | Micromassa | c/f _{2µm} Distribuição Relativa | | | |
| Bv1 | Grande quantidade de plagioclásios, piroxênios e grãos de quartzo; areia fina. | Coloração bruno-avermelhado | Porfírica | Nódulos orgânicos amorfos, ameboidal (raízes) e arredondados, estes envoltos pela micromassa. | Blocos angulares e subangulares; poros do tipo cavidades, canais, câmaras e fissurais (retilíneos e curvados). | Nódulos orgânicos nos agregados e preenchimentos soltos contínuos em algumas poucas áreas. |
| Bv2 | Grande quantidade de plagioclásios e grãos de quartzo, pouca expressão de biotita; areia fina. | Coloração bruno-avermelhado | Porfírica | Poucos nódulos orgânicos amorfos, com presença de carbonato de cálcio em seu interior. | Blocos angulares e subangulares, com alguns poucos arredondados. Poros planares bem acomodados do tipo canais e fissurais (retilíneos e curvados). | Agregados com zonas de ferruginização em todo o horizonte. |
| R | Grande quantidade de biotita, quartzo, menor expressão de anfibólios e feldspatos; areia grossa. | Coloração bruno-acinzentada | Quitônica-porfírica | Ausentes | Blocos angulares e subangulares fragmentados; poros fissurais interagregados. | Minerais com alto grau de alteração; dissolução de anfibólios e formação de esmectita; alteração de feldspatos e formação de argilominerais (caulinita), processo de caulinitização. |

Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

De modo geral, a coloração do Perfil 1 variou de acinzentada nos horizontes superficiais e amarelada, nos horizontes mais profundos. No Perfil 2, as colorações variaram de avermelhadas a acinzentadas, esta última nos horizontes mais profundos. As diferenças nas cores dos perfis analisados podem ter ocorrido devido a taxa de drenagem, influência da mineralogia e quantidade de matéria orgânica presentes. No horizonte que apresenta uma maior expressão vértica, foi propiciada uma melhor taxa de drenagem, proporcionando um ambiente mais oxidante. Em consequência, surgem condições mais favoráveis à formação da hematita, óxido de ferro responsável pela coloração avermelhada. Em contrapartida, no Perfil 1 foram encontrados magnetita e ilmenita, minerais importantes para a formação da cor escura dos Vertissolos, para além da matéria orgânica. A idade de formação desses solos não deve ser descartada, visto que em solos mais velhos, há a perda de sílica e a diminuição dos hidróxidos de alumínio, favorecendo a formação de hematita e a cor avermelhada no solo, processo refletido no Perfil 2.

O Perfil 01 foi classificado como Vertissolo Ebânico Órtico. Em seu horizonte Bv, foi possível observar a presença de nódulos orgânicos de tamanhos similares, encapsulados pela micromassa e com vestígios de carbonato de cálcio em seu interior, indicando, provavelmente, um processo de carbonatação. No horizonte BC há elevada presença de grãos de quartzo e minerais pleocrômicos, membros dos grupos dos anfibólios e biotitas. Assim como no horizonte acima, há também a presença de nódulos orgânicos, mas com processo de carbonação mais expressivo, possivelmente através da dissolução de calcita como resultado de alagamentos. Estruturas colunares na micromassa foram observadas; estas como características típicas de Vertissolos e fortes indicativos de pedogênese.

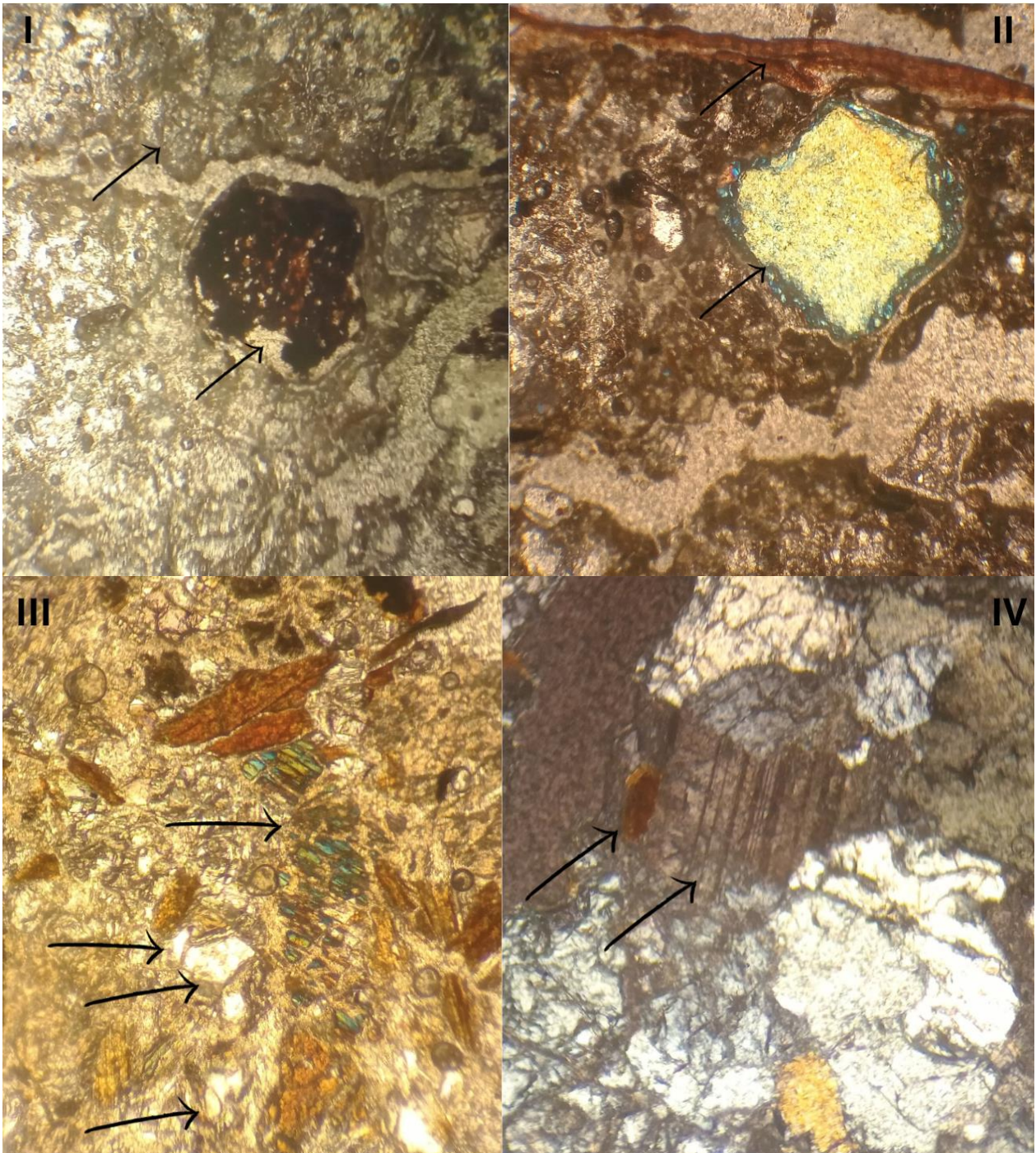
Ainda no horizonte BC, foi possível identificar a alteração de biotitas, resultando na transformação desse mineral para um de estrutura kata-alteromorfo, demonstrando elevado processo de intemperismo. Segundo Delvigne (1998), quando ocorre esse processo, há modificações na forma e volume dos minerais, com contornos um pouco mais claros e contínuos, mas com possibilidade de ainda ser identificado. Foi identificada também a presença de minerais alteromorfos, provavelmente da classe dos filossilicatos, com início de alteração em suas bordas e demais estruturas preservadas. Forte presença de hiporrevestimentos de óxidos de ferro na micromassa, sendo possível encontrar este processo de oxidação em ambientes alagados, assim como afirmar que essa oxidação se deu a partir de uma biotita, o que justificaria o surgimento de hematita nesse horizonte. Poros planares grandes estão presentes em ambos os horizontes,

expressões típicas dos materiais vérticos.

No horizonte CrK/R não foi identificada a presença de biotita. Há uma quantidade elevada de minerais na fração areia e pouca quantidade de poros. Em todo o horizonte é possível identificar a presença de nódulos orgânicos amorfos. Conforme apontado por Kovda *et al.* (2010), existe a possibilidade de queda desses grãos advindos dos horizontes superficiais através de rachaduras provenientes dos movimentos de contração e expansão, atividades típicas das argilas presentes neste solo. Em profundidades mais baixas, esses materiais orgânicos seriam transformados em húmus, material vegetal altamente composto.

Foi identificada a presença de grãos de plagioclásio por todo o horizonte, porém, apesar dos sinais de alteração, as maclas polissintéticas características de sua identificação estão presentes em sua maioria. Sua quantidade no referido horizonte justifica a presença dos elevados níveis de calcita, advindas do processo de calcitização. Ademais, sua alteração e cor acinzentada podem ser indicativos também do surgimento de argilominerais, como a esmectita, montmorilonita e ílita. Com relação à influência mineralógica na formação dos solos, Sampaio (2006) sinaliza que a presença de minerais como a hornblenda e os plagioclásios nesse horizonte, indica o estágio inicial de meteorização do material de origem e posterior processo evolutivo na formação desse solo.

Figura 6 - Fotomicrografias tomadas em Microscópio Petrográfico referentes ao Perfil 1.



Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

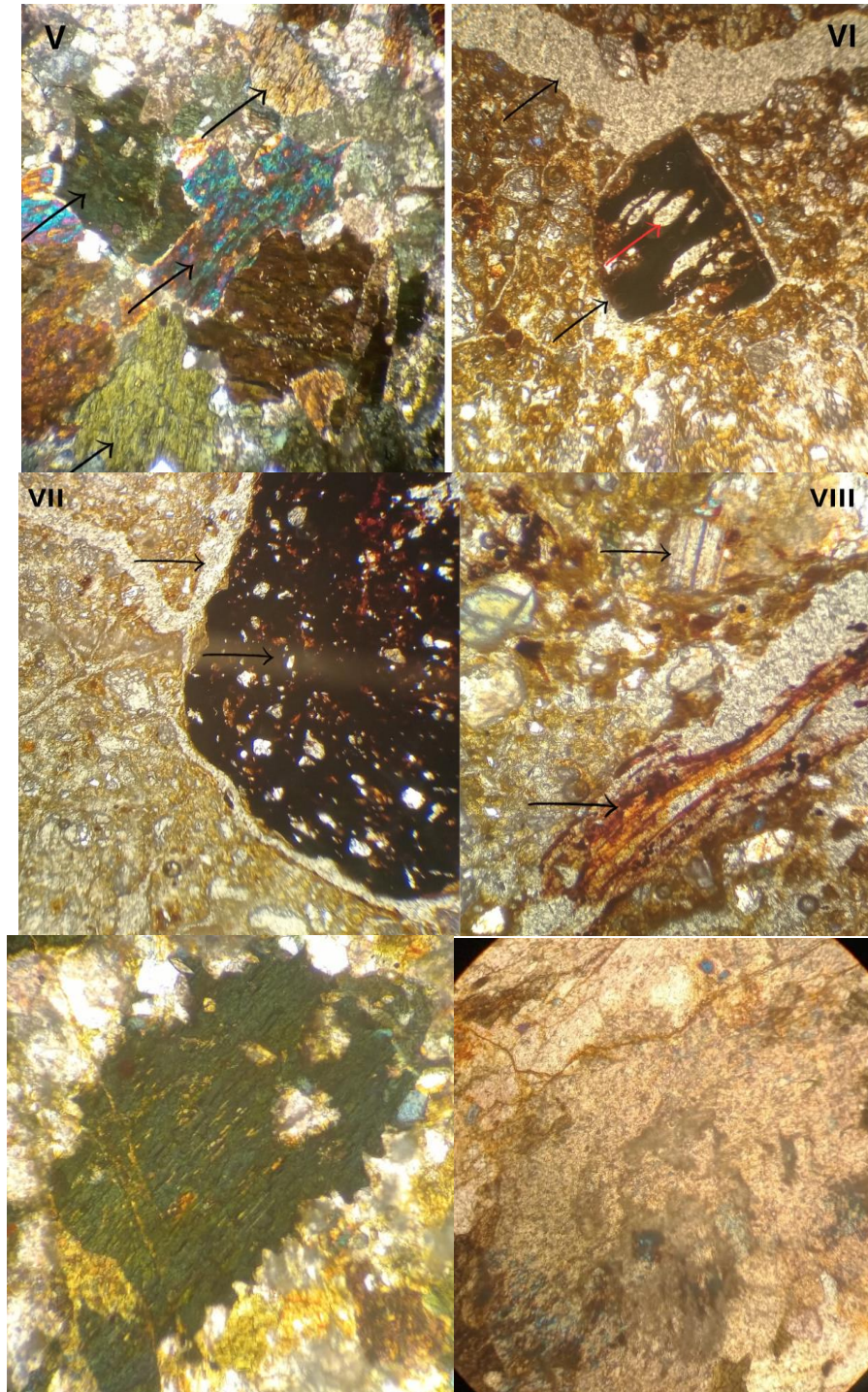
Legenda: I) nódulo orgânico com estrutura colunar e zonas de ferruginização em BC (ppl); II) Filossilicato alteromorfo, com presença de óxido de ferro em BC (xpl); III) Biotita kata-alteromorfa e grãos de quartzo em BC (xpl); e IV) Plagioclásio alterado com suas maclas preservadas, com presença de um mosqueado de óxido de ferro em CrK/R (ppl).

Perfil 2, classificado em campo como um Vertissolo háplico órtico: em seu horizonte Bv1 estão presentes em quantidade expressiva o quartzo e plagioclásios, além da elevada quantidade de areia. Nesse horizonte há presença de nódulos e zonas de ferruginização em toda a lâmina, indicativos de ambientes com saturação periódica de água. Nódulos revestidos de carbonato de cálcio, de origem orgânica, estão presentes em pequenas quantidades, encapsulando os minerais na fração areia e grãos de quartzo.

Em Bv2 é possível observar que a assembleia mineralógica desse horizonte é semelhante ao horizonte Bv1, porém, os minerais apresentam características indicativas de maior alteração. Ainda há a presença de nódulos orgânicos, mas em menor quantidade e bastante alterados. Grãos de plagioclásio com alto grau de alteração, possivelmente responsáveis pelo surgimento de argilominerais como a esmectita e caulinita.

No horizonte R (Cr/R1) a diversidade mineralógica é condizente com o tipo de rocha, alternando-se entre grãos de quartzo, biotita, piroxênios e anfibólios (hornblendas). todos os minerais presentes estão em algum nível de alteração, conforme fotos a seguir, mas os grãos do horizonte mais profundo demonstram alto grau de modificação (FIGURA 7).

Figura 7 - Fotomicrografias tomadas em Microscópio Petrográfico referentes ao Perfil 2.



Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

Legenda: V) Biotita, anfibólios (verdes) e piroxênios no horizonte R (xpl); VI) nódulo orgânico amorfo, com intrusão de carbonato de cálcio e poro plano bem acomodado em Bv2 (xpl); VII) nódulo orgânico com sinais de ferruginização, revestido pela micromassa e com processo de encapsulamento de minerais em Bv2 (xpl); VIII) Grão de plagioclásio

alterado e zonas de ferruginização em Bv2 (xpl); IX) grão de hornblenda alterado em P6 R (xpl) e X) Micromassa siltosa em P6 R (PPL).

4.2 Processos pedogenéticos

Dentre os principais processos pedogenéticos encontrados estão a transformação/neoformação de minerais, a pigmentação dos horizontes e a ferruginização, tanto da micromassa - na forma de mosqueados, quanto nos nódulos orgânicos. Para além, foi possível observar a importância do intemperismo para a formação dos horizontes, pois, além de alterar as partículas da fração areia para partículas menores (silte e argila), ele foi o responsável pela segregação de Fe – tendo como fontes primárias a biotita e a hornblenda – e pela formação secundária de carbonato de cálcio, no processo de carbonatação, ocorrido em ambos os perfis nos horizontes B. Os piroxênios e feldspatos em P2, colaboram com a ocorrência do processo pedogenético citado anteriormente, assim como a biotita em P1.

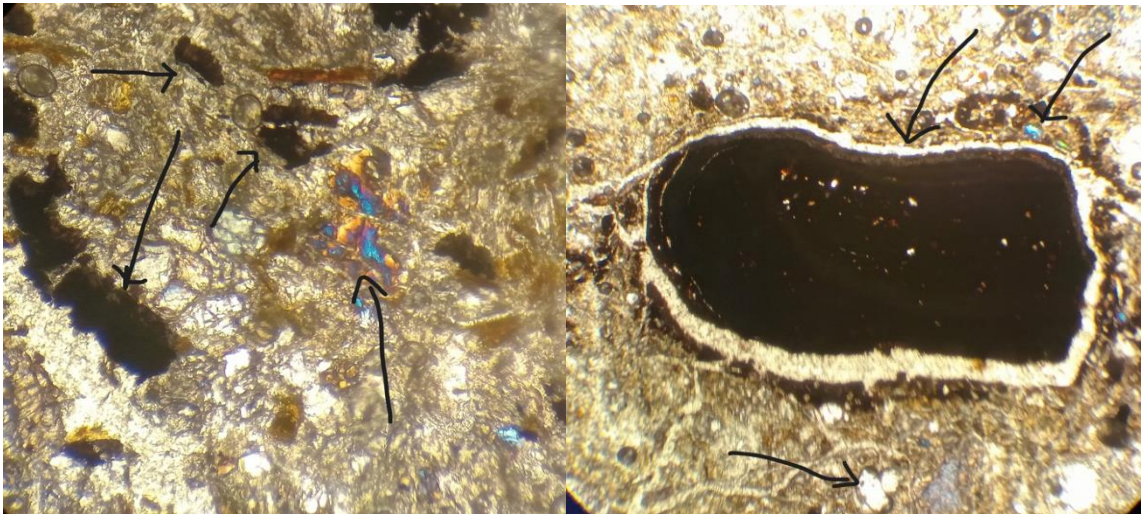
A transformação de minerais através da liberação de íons para a formação de argilominerais, como as esmectitas e caulinitas, imprimem nesse solo a característica de retenção de água e nutrientes, assim como sua propriedade vértica. Para além dessa capacidade, as transformações contribuíram também para a formação de óxidos de ferro, como a hematita - presente em zonas de ferruginização, mosqueados e nódulos orgânicos de diferentes horizontes dos perfis analisados - e na formação de carbonatos, vistos em análise micromorfológica, porém ausentes nas rochas.

Observada a quantidade de argilominerais que surgiram em ambos os perfis, não é descartado que a bissialitização possa ter sido um processo geoquímico ocorrido nos horizontes superficiais. Ademais, minerais como feldspato e biotita depois de intemperizados, também podem formar argilas expansivas em horizontes mais profundos.

Os solos dos perfis 1 e 2 têm características mineralógicas semelhantes entre si. Seus grãos são formados por quartzo, feldspatos (plagioclásio), hornblenda, nódulos ferruginosos, minerais opacos, piroxênio e biotita, em proporções variadas. Nos horizontes superficiais, o padrão de distribuição relacionada é predominantemente porfírica; feição condizente com a textura mais argilosa desses horizontes e formação desse tipo de solo. Os poros são predominantemente planos, ocorrendo ainda canais, poucas cavidades e alguns poros em rede, que expressam o horizonte vértico. As pedofeições mais comuns encontradas foram os nódulos típicos e mosqueados, ambos ferruginosos e alguns minerais alteromorfos, em ambos os perfis.

A pedoturbação, também conhecido como autoinversão, é um processo pedogenético específico do qual os solos que apresentam alta capacidade de expansão e contração quando secos, desenvolvam rachaduras devido a essa capacidade e recebam materiais advindos de sua porção superior. Corroborando com esse processo, foram identificados nos horizontes de ambos os perfis analisados, a presença de nódulos de origem orgânica, sendo possível compreender as interações das argilas de alta atividade com esses constituintes. Com a abertura de fendas no solo, através da expansão e contração das argilas, esse material orgânico foi deslocado para maiores profundidades. Através da micromorfologia, foi observado que os tamanhos e formas desses nódulos variaram de acordo com o horizonte em que se encontravam. Nos horizontes superficiais, se mantiveram estáveis tanto no tamanho quanto no formato. Já em horizontes mais profundos, mostraram-se amorfos e com incorporação à micromassa, conforme mostram as fotomicrografias (FIGURA 8) a seguir.

Figura 8: Nódulos orgânicos que se apresentam em diferentes tamanhos e formas.



Fonte: Andressa Carvalho Damasceno (2023).

Legenda: À esquerda, nódulo preservado, revestido pela micromassa, com grãos de minerais na fração areia fina e quartzos, P02, horizonte Bv (ppl). Na foto à direita, nódulos amorfos e sua incorporação à micromassa, bem como os minerais na fração areia em tamanhos maiores, P01, horizonte CrK/R (ppl).

Ademais, foi possível observar que a intemperização dos constituintes minerais se deu de maneiras distintas. Referente à sua cor, Stoops *et al.* (2010) sinalizam que a cor mais escura da micromassa é típica desse solo, devendo ser atribuída à intensa complexação entre as argilas e a matéria orgânica.

Por meio da análise micromorfológica das lâminas delgadas do horizonte R, foi possível visualizar uma quantidade expressiva de silte compondo a micromassa. Na análise e observação em campo, realizada pelos pesquisadores presentes, a textura desse horizonte foi classificada como franco-arenosa; bem como a constatação de ausência de qualquer material siltoso próximo ao local. Sua presença em horizontes subsuperficiais sinaliza que esse silte tenha sofrido translocação dentro do perfil, acumulando-se próximo ao material de origem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gênese de minerais caulíníficos nos horizontes superficiais em P1 e em horizontes diversos em P2 não é uma atribuição exclusiva de climas semiáridos, podendo ocasionalmente surgirem em climas quentes e úmidos. Considerando a alta taxa de evapotranspiração e a manutenção de bases e sais desse solo, as perdas parciais dessas bases e sílicas contribuíram não somente para a formação de argilas do tipo 1:1 (caulinita), mas também para argilominerais do tipo 2:1 (esmeclitas). Para que ocorresse essa coexistência de argilominerais em ambos os perfis, é possível afirmar, então, que a gênese dos minerais esmeclíticos e caulíníficos presentes nesse solo se deram por meio da alteração de minerais máficos presentes no material de origem e da dessilicalização da montmorilonita.

Através das análises micromorfológicas e sua identificação, é possível sustentar que houve translocação de silte através de fissuras provocadas por expansão/contração ou bioturbação entre os horizontes, comprovando sua quantidade expressiva em horizontes subsuperficiais do P2 e a ausência de materiais siltosos em seu entorno.

A presença de hematita em ambos os perfis e diferentes horizontes sugere a ocorrência do processo de ferralitização, bem como corrobora com os estudos que sinalizam a capacidade de retenção de água dos Vertissolos e refletem o clima sazonal de chuva/seca do Semiárido brasileiro.

Por meio das análises foi possível identificar a presença de grãos orgânicos e sua interação com a micromassa, tanto em horizontes superficiais quanto subsuperficiais. Essa observação permite afirmar que seu deslocamento pode ter sido por meio de fraturas e fendas características desse solo, trazendo os materiais mais superficiais para as camadas mais profundas. Nas estações prolongadas de seca, como é o caso do Semiárido brasileiro, a pedoturbação age de maneira mais efetiva, pois as fendas provocadas no solo nesse período climático se mantem por mais tempo, permitindo com que sejam preenchidas totalmente.

Por fim, é possível afirmar que, apesar de serem materiais de origem distintos nos perfis analisados, o clima e, conseqüentemente o intemperismo, foram os fatores preponderantes para que houvesse a formação de um mesmo tipo de solo. Ademais, não houve uma variação expressiva da mineralogia de ambas as litologias, corroborando para a gênese dos Vertissolos.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO FILHO J. C. *et al.* **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco.** Recife: Embrapa Solos, 2000. p. 382. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/337631/levantamento-de-reconhecimento-de-baixa-e-media-intensidade-dos-solos-do-estado-de-pernambuco> Acesso em: 12 jan. 2022.
- ARAÚJO FILHO, J. C. *et al.* **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas**, cap. 6: **Solos do semiárido: características e estoque de carbono.** Embrapa semiárido, p. 96, 2022.
- AB’SÁBER, A, N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas.** Ateliê editorial. São Paulo, 2003. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7993715/mod_resource/content/1/AB%20SABER-Os%20dom%C3%ADnios%20de%20natureza.pdf Acesso em: 13 de jan. de 2022
- BARBOSA, G. M. N. **Gênese e caracterização geotécnica de Vertissolos do Estado da Bahia.** 132f. 2017. Doutorado (Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/29303/1/texto%20completo.pdf> Acesso em: 27 de jun. de 2023
- BIGARELLA *et al.* **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Editora da UFSC, 1996.
- BRADY, N. *et al.* **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** Editora Bookman, 2013. p. 36.
- BRASIL. **Acervo digital geográfico e populacional do semiárido nordestino.** Instituto Nacional do Semiárido e Sistema de Gestão da Informação e do Conhecimento do Semiárido Brasileiro - INSA/SIGSAB, 2010. Disponível em: www.gov.br/insa/pt-br/semiario-brasileiro Acesso em: 20 jan. 2023.
- BULLOCK, P. *et al.* **Handbook for soil thin section description.** Albrington: Waine Research, 1985. p. 152.
- CASTRO, S. S. **Micromorfologia de solos aplicada ao diagnóstico de erosão.** In: GUERRA *et al.* (Eds), **Erosão e conservação de solos.** Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1999. p. 127-163.
- CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de Micromorfologia de solos.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, Minas Gerais, 2019.
- CASTRO, S. S. *et al.* **Micromorfologia do solo: bases e aplicações.** In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 107-164, 2003.

Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001608792> Acesso em: 15 de nov. de 2022.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – COGERH Ceará. Disponível em <https://portal.cogerh.com.br/banabuiu-2/>. Acesso em: 12 de dez. de 2023.

COULOMBE, C. E. *et al.* **Mineralogy and chemistry of Vertisols**. In: Ahmad N, Mermut AR, organizadores. *Vertisols Technol their Manag Dev soil Sci* 24. Amsterdam: Elsevier Science; p. 115–200, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166248196800079> Acesso em: 10 de jun. de 2023.

COOPER, C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa, Brasília - DF. Ed. 3. Revista e Ampliada, 2017. p. 527. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-de-metodos-de-analise-de-solo> Acesso em: 18 de out. de 2023.

DELVIGNE, J. E. **Atlas of micromorfology of mineral alteration and weathering**. Canadian mineralogist special publication.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SEMI-ÁRIDO. **Potencialidades da água de chuva do Semiárido brasileiro**. Petrolina, PE: Embrapa semiárido, 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/157643/1/Brito.Livroaguachuva.pdf>. Acesso em: 04 de jan. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SEMIÁRIDO. **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. SILVA, P. G. C. *et al.* Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/861906>. Acesso em 15 de jan. de 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de classificação dos solos**. Ed. 3. Brasília, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. Ed. 3. Brasília, 2017.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F. **Introdução à descrição micromorfológica de lâminas delgadas de solos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

FURQUIM, S. A. C. *et al.* **Mineralogia de Vertissolos Brasileiros: influência nas propriedades, gênese e classificação dos solos**. Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas/ICAQF/UNIFESP/FAPESP, 2023.

GRIM, R. E. **Applied clay mineralogy**. 1962. MCGRAW HILLBOOK COMPANY I. N. C; GUERRA, A. T. **Novo Dicionário Geológico - Geomorfológico - 6ª Edição**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 711.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Madalena, Ceará**, 2022. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/madalena/panorama>

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. Governo do Estado do Ceará. **Perfil básico municipal de Madalena**. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA E INFORMAÇÃO DO CEARÁ - IPLANCE. **Atlas do Ceará**. Fortaleza, 1997. p.65.

JACOMINE, P. K. T. **Solos sob caatinga: características e uso agrícola**. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS: UFV, p. 95-133, 1996. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/896995/1/CoelhoXIVSBGFA1.pdf> Acesso em: 19 de mar. de 2023.

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

KOVDA, I. *et al.* **Vertic Processes and Specificity of Organic Matter Properties and Distribution in Vertisol**. Eurasian Soil Science, v. 43, n. 13, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229310130065> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

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

MONTENEGRO, A. A. A; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. IN: **Recursos hídricos em regiões semiáridas** - Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012.

OLIVEIRA, F. S. *et al.*, **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 292-337, 2021. Disponível em: Acesso em: 11 de out. de 2022.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Ed. 4. Piracicaba: FEALQ, 2011.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. p. 201.

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5 ed. Editora UFLA, 2007.

SAMPAIO, E. **Mineralogia do solo**. Departamento de Geociências, Universidade de Évora, 2006.

SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidades de água para as plantas cultivada**. Brasília, DF: ABEAS, 1998.

STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. p. 184.

STOOPS, G. *et al.* **Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths**.

Elsevier, 2010.

KUBIENA, W.L. **Micropedology**. Ames: Collegiate Press, 1938. p. 17.