

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

LEONARDO CRISTIANO DA SILVA FREITAS

**CARACTERIZAÇÃO DE SAPROLITOS E
SOLUMS RASOS DERIVADOS DE ROCHAS CRISTALINAS NO
SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

RECIFE

2025

Leonardo Cristiano Da Silva Freitas

Geógrafo

Caracterização de saprolitos e solums rasos derivados de rochas cristalinas no semiárido pernambucano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos

Coorientadora: Dra. Cybelle Souza de Oliveira

Recife

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

F862c Freitas, Leonardo Cristiano da Silva.

Caracterização de saprolitos e solums rasos derivados de rochas cristalinas no semiárido pernambucano / Leonardo Cristiano da Silva Freitas. – Recife, 2025.

100 f.; il.

Orientador(a): Jean Cheyson Barros dos Santos.

Co-orientador(a): Cybelle Souza de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Química do solo. 2. Física do solo. 3. Mineralogia do solo. 4. Morfologia 5. Regiões áridas - Pernambuco. I. Santos, Jean Cheyson Barros dos, orient. II. Oliveira, Cybelle Souza de, coorient. III. Título

CDD 631.4

LEONARDO CRISTIANO DA SILVA FREITAS

Caracterização de saprolitos e solums rasos derivados de rochas cristalinas no semiárido pernambucano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2025

Prof, Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Resmini Sartor

Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Antônio Carlos Azevedo

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

À minha mãe, Severina Silva.

Ao meu pai, Cristiano Freitas (In memoriam).

Aos meus irmãos, Leandro, Luana, Leonarda e Miguel.

Dedico.

*Aos camponeses e agricultores do semiárido brasileiro,
que lutam incansavelmente pela convivência com a terra.*

Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos concedidas ao longo da minha vida e por tudo o que ainda está por vir.

À minha mãe, por seu amor incondicional, dedicação e apoio inestimável em todos os momentos da minha trajetória, e aos meus irmãos, por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos, por todo apoio, confiança e incentivo ao longo da minha formação como pesquisador. Sua orientação, paciência e ensinamentos foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico, científico e profissional.

À minha coorientadora, Dra. Cybelle Souza, pelos valiosos conselhos, pela disponibilidade e pelo suporte essencial durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) por todo o conhecimento e oportunidades proporcionadas ao longo da minha jornada na pós-graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, à coordenadora Prof.^a Dra. Giselle Fracetto, e a todos(as) os(as) professores(as) do programa, cujos ensinamentos e contribuições foram essenciais para minha formação acadêmica e profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo financiamento da bolsa de estudos durante os dois anos do curso, permitindo a concretização deste trabalho.

Aos amigos Denis Meireles, Karina Burity e Paulo Dias, pela parceria, troca de conhecimento e auxílio imprescindível durante as análises no laboratório de química do solo.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Química e Intemperismo do Solo, em especial Analice Nunes, Daiane, Elayni, Karollayny, Karina Burity, Sávio Martins e Taila Silva, pelo apoio durante as coletas e análises, pelo compartilhamento de conhecimento e pela colaboração ao longo desta jornada. Suas contribuições foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Aos laboratórios de Mineralogia do Solo, Física do Solo e Química do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE, e ao Laboratório de Geomorfologia do Quartenário – GEQUA/UFPE, por todo suporte técnico e estrutural para a realização desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas que fizeram parte da minha trajetória acadêmica durante esses dois anos de pós-graduação, tornando essa experiência ainda mais enriquecedora.

A todos e todas, meu sincero e profundo muito obrigado.

“O sertanejo é, antes de tudo, um forte.”

– Euclides da Cunha (1902).

Caracterização de saprolitos e solums rasos derivados de rochas cristalinas no semiárido pernambucano

RESUMO

Os solums rasos, solums com profundidades inferiores a 50 cm, ocupam vastas áreas do semiárido pernambucano. No contexto atual de mudanças climáticas, a busca por estratégias de uso da terra sustentáveis, que atendam às demandas de pequenos agricultores em regiões semiáridas, tem ganhado destaque. Dentre os componentes das paisagens semiáridas, destacam-se os solums rasos; entretanto, sua potencialidade agrícola é frequentemente subestimada devido à profundidade limitada, sendo considerado inadequado para a agricultura por muitas agências de fomento. Embora diferentes características do regolito sejam reconhecidas por contribuírem para a potencialidade agrícola dos solos, a influência do saprolito subjacente aos solums rasos ainda é pouco conhecida. Dessa forma, o objetivo, por meio deste estudo, é Caracterizar os atributos morfológicos, mineralógicos, físicos e químicos de solums rasos e respectivos saprolitos derivados de rochas cristalinas no semiárido pernambucano. Para isso, foram coletadas amostras de solums rasos e respectivos saprolitos provenientes de diferentes rochas cristalinas em três perfis localizados nos municípios de Gravatá, Serra Talhada e Floresta (PE), visando abarcar um gradiente climático com diferentes contextos semiáridos. Em campo, foi realizada a descrição morfológica e a classificação do conjunto solum-saprolito. Em seguida, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para as análises físicas, químicas e mineralógicas em laboratório, seguindo as metodologias padrão da Embrapa (2017). Nas propriedades físicas, destacou-se o aumento dos teores de argila nos horizontes saprolíticos do Neossolo, enquanto no Planossolo e Luvisolo os maiores teores ocorreram Bt, permanecendo alto nos saprolitos. A areia total foi mais elevada no horizonte A e nos saprolitos, com predomínio da fração grossa. A ADA acompanhou os teores de argila, sendo mais alta nos horizontes Bt e Cr1 de P2 e P3, e menor em P1. O grau de flocculação foi baixo em todos os perfis, especialmente em P3, indicando maior risco de dispersão e erosão. A densidade do solo foi menor nos horizontes do solum de P1 e P2, e em todos os horizontes de P3, com maiores limitações no saprolito. A porosidade foi maior nos horizontes do Solum e reduzida no saprolito. Os atributos químicos revelaram altos teores de bases trocáveis nos horizontes saprolíticos, com uma CTC potencial variando de 98,8 mmol_c kg⁻¹, no Neossolo Litólico, a 504,5 mmol_c kg⁻¹, no Luvisolo Crômico, além de baixas concentrações de Al³⁺, baixa porcentagem de sódio trocável (PST) e valores elevados de fósforo, especialmente no Cr2 do Planossolo Háplico, chegando a 387 mg kg⁻¹. Essas características indicam que os saprolitos podem melhorar a capacidade de retenção de nutrientes e a disponibilidade de elementos essenciais para o desenvolvimento das culturas em áreas de solums rasos. A presença de raízes no saprolito reforçam a importância desses horizontes abaixo dos solums rasos. A mineralogia demonstrou que os saprolitos contêm argila do tipo 2:1, como esmectitas e vermiculitas, e minerais primários, do grupo das micas e feldspatos, que podem funcionar como uma reserva de nutrientes. Conclui-se que, embora os solums rasos apresentem limitações específicas, sobretudo relacionadas aos atributos físicos, os horizontes saprolíticos revelam características químicas favoráveis que podem contribuir para a ampliação do uso agrícola desses solos no semiárido. Tais potencialidades são relevantes para camponeses e pequenos agricultores que manejam essas áreas no polígono das secas.

Palavras-chaves: Química do solo. Física do solo. Mineralogia do solo. Morfologia do solo. Regiões Áridas – Pernambuco.

Characterization of Saprolites and Shallow Solums Derived from Crystalline Rocks in the Semi-Arid Region of Pernambuco

ABSTRACT

Shallow solums, defined as solums with depths of less than 50 cm, occupy vast areas of the semi-arid region of Pernambuco. In the current context of climate change, the search for sustainable land use strategies that meet the needs of small farmers in semi-arid regions has gained prominence. Among the components of semi-arid landscapes, shallow solums stand out; however, their agricultural potential is often underestimated due to their limited depth, leading many funding agencies to consider them unsuitable for agriculture. Although various characteristics of the regolith are recognized as contributing to the agricultural potential of soils, the influence of the saprolite underlying shallow solums remains poorly understood. Therefore, this study aims to characterize the morphological, mineralogical, physical, and chemical attributes of shallow solums and their respective saprolites derived from crystalline rocks in the semi-arid region of Pernambuco. To this end, samples of shallow soils and their respective saprolites were collected from different crystalline rocks in three profiles located in the municipalities of Gravatá, Serra Talhada, and Floresta (PE), aiming to cover a climatic gradient with different semi-arid contexts. In the field, morphological descriptions and classifications of the solum–saprolite systems were carried out. Deformed and undeformed samples were then collected for physical, chemical, and mineralogical analyses in the laboratory, following the standard methodologies of Embrapa (2017). In the physical properties, an increase in clay content was observed in the saprolitic horizons of the Entisol, while in the Planosol and Luvisol, the highest clay contents were found in the Bt horizon and remained high in the saprolites. Total sand was higher in the A horizon and in the saprolites, with a predominance of the coarse fraction. Dispersed clay content followed the clay levels, being higher in the Bt and Cr1 horizons of profiles 2 and 3, and lower in profile 1. The degree of flocculation was low in all profiles, especially in profile 3, indicating a greater risk of dispersion and erosion. Soil bulk density was lower in the solum horizons of profiles 1 and 2, and in all horizons of profile 3, with greater limitations found in the saprolite. Porosity was higher in the solum horizons and reduced in the saprolite. The chemical attributes revealed high levels of exchangeable bases in the saprolitic horizons, with a potential CEC ranging from 98.8 mmolc kg⁻¹ in the Litholic Entisol to 504.5 mmolc kg⁻¹ in the Chromic Luvisol, as well as low concentrations of Al³⁺, low exchangeable sodium percentage (ESP), and high phosphorus values, especially in the Haplic Planosol, reaching 387 mg kg⁻¹. These characteristics indicate that saprolites can enhance nutrient retention capacity and the availability of essential elements for crop development in areas with shallow solums. The presence of roots in the saprolite reinforces the importance of these horizons beneath shallow solums. Mineralogical analysis showed that the saprolites contain 2:1 clay minerals, such as smectites and vermiculites, as well as primary minerals from the mica and feldspar groups, which can serve as nutrient reserves. It is concluded that, although shallow solums present specific limitations, particularly related to physical attributes, the saprolitic horizons reveal favorable chemical characteristics that can contribute to expanding the agricultural use of these soils in the semi-arid region. These potentialities are especially relevant for peasants and small farmers who manage such areas in the drought polygon.

Keywords: Soil chemistry. Soil physics. Soil mineralogy. Soil morphology. Arid regions – Pernambuco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do semiárido brasileiro e do bioma Caatinga.	19
Figura 2 – Representação geral do modelo de subdivisão do regolito.	25
Figura 3 – Mapa de localização com as espacializações dos perfis de coletados no semiárido pernambucano.....	29
Figura 4 – Perfil de Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário, município de Gravatá (PE)..	45
Figura 5 – Perfil de Planossolo Háptico Sáfico típicos, município de Serra Talhada (PE).....	46
Figura 6 – Perfil de Luvisolo Crômico Órtico típico, município de Floresta (PE).....	48
Figura 7 – Principais litologias presentes nos perfis de solos rasos analisados no semiárido pernambucano: A - gnaiss do Complexo Orobó 1; B – granito da Suíte Intrusiva Itaporanga; C – micaxisto do Complexo São Caetano.	49
Figura 8 – Presença de raízes nos horizontes saprolíticos do Neossolo Litólico eutrófico fragmentário: A – raízes pivotantes grossas e pivotantes secundárias finas no Cr1; B, C e D – presença de raízes pivotantes secundárias médias e finas nas fraturas dos saprolitos.	51
Figura 9 – Distribuição das raízes no perfil de Planossolo Háptico Sáfico Típico: 1 – Perfil do solo; 1a – espaçamento entre os blocos colunares sendo utilizado pelas raízes como caminho preferencial em direção ao saprolito; 1b – presença de raízes pivotantes secundárias finas no horizonte Cr1; 2 – raízes se desenvolvendo na zona de transição entre os horizontes A e Bt.	52
Figura 10 – Distribuição das raízes no perfil de Luvisolo Crômico Órtico típico: A – presença de raízes pivotantes grossas no horizonte Cr1, seguindo as zonas de fraturas; B e C – presença de raízes pivotantes grossas no e finas Cr2 entre 70 e 80 cm de profundidade; D – canal de raiz grossa morta sendo reutilizado por outras raízes no horizonte Bt em direção ao saprolito.	53
Figura 11 – Difractogramas da fração areia dos perfis e horizontes estudados.	80
Figura 12 – Difractogramas da fração silte dos perfis e horizontes estudados.	81
Figura 13 – Difractogramas da fração argila não orientada dos perfis e horizontes estudados.....	82
Figura 14 – Difractogramas da fração argila orientada dos perfis e horizontes estudados.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade de raízes no conjunto solum-saprolito dos perfis estudados.	50
Tabela 2 – Propriedades físicas dos perfis de solo rasos e respectivos saprolitos característicos do semiárido de Pernambuco.	59
Tabela 3 – Propriedades químicas dos perfis de solos rasos e respectivos saprolitos característicos do semiárido de Pernambuco.	65
Tabela 4 – Propriedades físicas dos diferentes tratamentos da TFSA das amostras do saprolitos em solos rasos no semiárido de Pernambuco.	73
Tabela 5 – Propriedades químicas dos diferentes tratamentos da TFSA das amostras de saprolitos em de solos rasos no semiárido pernambucano.....	74
Tabela 6 – Geoquímica das amostras de saprolitos e solums rasos estudados no semiárido de Pernambuco.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios para classificação e descrição de horizontes do saprolito e camada de rocha.	33
Quadro 2 – Descrição morfológica do perfil 1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário.	44
Quadro 3 – Descrição morfológica do perfil 2 – Planossolo Háplico Sáfico típico.....	46
Quadro 4 – Descrição morfológica do perfil 3 – Luvisolo Crômico Órtico típico.	47
Quadro 5 – Constituintes minerais das frações areia, silte e argila dos perfis estudados.	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipótese	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 O semiárido pernambucano: aspectos fisiográficos e socioeconômicos	17
2.2 Solums rasos no semiárido e potencialidades	20
2.3 Saprolito abaixo de solums rasos	23
2.4 Atributos Químicos, físicos, mineralógicos e morfológicos de saprolitos.....	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 Área de estudo	29
3.2 Caracterização geoambiental	30
3.2 Procedimentos metodológicos	31
3.2.1 Coleta das amostras	31
3.2.2 Classificação e descrição morfológica do solo e saprolito	31
3.2.2.1 Horizontes do saprolito e camada de rocha	32
3.2.3 Presenças de raízes no conjunto solum-saprolito	37
3.2.4 Análises físicas.....	37
3.2.5 Análises químicas.....	39
3.2.6 Diferentes tratamentos da TFSA do saprolito	41
3.2.6.1 Testes de Variação	42
3.2.7 Análises geoquímicas	42
3.2.8 Análises mineralógicas.....	42

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Descrição morfológica e classificação dos perfis	44
4.2 Presenças de raízes no conjunto solum-saprolito.....	49
4.4 Caracterização dos atributos físicos.....	55
4.5 Caracterização dos atributos químicos.....	63
4.6 Diferentes tratamentos na obtenção da TFSA no saprolito	69
4.6 Caracterização geoquímica	75
4.7 Mineralogia das frações.....	78
4.7.1 Fração Areia	80
4.7.2 Fração Silte	81
4.7.3 Fração Argila	81
5 CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A – Teste de variação para as propriedades físicas e químicas de Neossolo Litólico, sob diferentes tratamentos dos horizontes do saprolito.....	97
APÊNDICE B – Teste de variação para as propriedades físicas e químicas de Planossolo Háplico, sob diferentes tratamentos dos horizontes do saprolito.....	98
APÊNDICE C – Teste de variação para as propriedades físicas e químicas do Luvisolo Crômico, sob diferentes tratamentos dos horizontes do saprolito.	99

1 INTRODUÇÃO

Os solums rasos cobrem extensas áreas do semiárido pernambucano e desempenham um papel crucial na agricultura. Na região semiárida, os solos são moldados por condições climáticas adversas, marcadas pela escassez hídrica, baixa precipitação, altas temperaturas e intensa evapotranspiração. Essas condições limitam o desenvolvimento de solums profundos e favorecem a formação de solums rasos e pouco desenvolvidos.

Apesar de suas limitações, são esses solums que sustentam grande parte da agricultura familiar e de subsistência dos povos e comunidades tradicionais, garantindo o sustento de milhares de famílias em uma das regiões semiáridas mais densamente povoadas do mundo. Contudo, a ausência de políticas públicas adequadas e financiamentos rural agrava a vulnerabilidade socioeconômica da região, comprometendo segurança alimentar das comunidades locais e reforçando seu *status* como uma das regiões menos desenvolvidas do país.

Dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que as regiões tropicais semiáridas estão entre as mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, o que tende intensificar os riscos à segurança alimentar e à resiliência das comunidades que dependem da agricultura (FAO, 2021; IPCC, 2021). Nesse cenário, a busca por alternativas que promovam a convivência sustentável com o semiárido é essencial.

Apesar de sua importância para a subsistência de muitas famílias, os solums rasos são frequentemente subestimados e classificados como impróprios para a agricultura por órgão de fomento, o que restringe o acesso de pequenos produtores a linhas de crédito e incentivos que poderiam permitir o desenvolvimento de práticas agrícolas adequadas para as condições semiáridas.

São considerados rasos, os solums que apresentam profundidades inferiores a 50 cm, e pouco espessos os com profundidade entre 50 e 100 cm (CURI et al., 2017). Nos solums rasos do semiárido, o saprolito, conforme definido por Becker (1895), como um manto de intemperismo *in situ* resultante da degradação física, química e biológico da rocha matriz, desempenha um papel fundamental como extensão funcional do perfil de solo.

O saprolito é o produto isovolumétrico não transportado (autóctone) resultante da intemperização física, química e biológica das rochas, composto por minerais primários e

secundários, formando horizontes localizados abaixo dos solums, denominada de zona saprolítica. O estudo do saprolito pode ser considerado a chave para compreender a real potencialidade agrícola desses solums no semiárido brasileiro. Nessas áreas de escassez hídrica, o saprolito pode atuar como uma camada de suporte adicional do Solum.

Do ponto de vista geoambiental, o saprolito também exerce funções ecossistêmicas relevantes, como a regulação do ciclo de nutrientes, a retenção hídrica e a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de CO₂ (MANNING; RENFORTH, 2013). Para Santos et al. (2022), no contexto da “zona crítica”, o saprolito é reconhecido como uma camada essencial à manutenção da vida, o que destaca a importância de sua inclusão nos estudos da ciência do solo, especialmente na saprolitologia.

A classificação da aptidão agrícola de áreas com solums rasos, sem considerar o saprolito subjacente, resulta em avaliações equivocadas e subestima o potencial produtivo dessas áreas. É necessário compreender o conjunto solum + saprolito como uma unidade integrada, visto que o saprolito pode fornecer suporte morfológico, mineralógico, físico e químico essencial ao desenvolvimento das plantas cultivadas (SANTOS et al., 2018).

Portanto, os solums rasos não devem ser avaliados isoladamente. Alguns saprolitos devem ser considerados como extensão funcional dos solums rasos, contribuindo para sua profundidade efetiva, fertilidade e capacidade produtiva. Esse reconhecimento pode auxiliar no fortalecimento da segurança e soberania alimentar da região semiárida, especialmente diante do desafio das mudanças climáticas.

Com isso, por meio deste estudo, busca-se investigar os atributos químicos, físicos, mineralógicos e morfológicos dos solums rasos e dos respectivos saprolitos no semiárido pernambucano. A pesquisa se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU ao abordar a segurança alimentar (ODS 2), a sustentabilidade das comunidades rurais (ODS 11), os impactos das mudanças climáticas e a necessidade de adaptação (ODS 13), além da conservação do solo e da biodiversidade (ODS 15).

1.1 Hipótese

Os saprolitos de diferentes litologias cristalinas no semiárido pernambucano apresentam atributos morfológicos, mineralógicos, físicos e químicos que contribuem para os solums rasos sobrejacentes, favorecendo a penetração radicular e a nutrição vegetal.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Caracterizar os atributos morfológicos, mineralógicos, físicos e químicos de solums rasos e respectivos saprolitos derivados de rochas cristalinas no semiárido Pernambucano.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar como os atributos dos saprolitos de diferentes litologias cristalinas contribuem para o potencial agronômico dos solums rasos;
2. Avaliar quais tipos de saprolitos apresentam atributos mais propícios à nutrição vegetal;
3. Indicar como os atributos morfológicos e físicos do saprolito podem facilitar a penetração do sistema radicular da vegetação em sua estrutura;
4. Comparar os atributos físicos, químicos e mineralógicos do saprolitos com os dos solums;
5. Avaliar se diferentes tratamentos da TFSA do saprolito interferem nos valores dos atributos químicos e físicos dos saprolitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O semiárido pernambucano: aspectos fisiográficos e socioeconômicos

O semiárido Pernambucano está localizado na região Nordeste do Brasil, apresentando uma grande diversidade paisagística, fortemente influenciada por suas características fisiográficas e ambientais. Este conjunto heterogêneo de paisagens se reflete numa grande biodiversidade de fauna e flora e em padrões biogeográficos complexos, que incluem espécies endêmicas exclusivas da região (GARIGLIO et al., 2010; INSA, 2023; QUEIROZ; RAPINI; GIULIETTI, 2006), possuindo mais espécies por metro quadrado que outros biomas, como a Amazônia (FERNANDES; CARDOSO; QUEIROZ, 2020).

Na região semiárida, o clima exerce papel preponderante na diversificação dos componentes da paisagem, como o relevo, os solos e a vegetação. Nesse sentido, Ab'Saber (2003), ao definir os grandes domínios de paisagístico do Brasil, classifica a região semiárida brasileira como a grande região seca da América do Sul, constituída pelos sertões do Nordeste brasileiro, e denominada de domínios dos sertões secos ou das Caatingas.

Diferenças sub-regionais no relevo têm sido associadas à variabilidade espacial de condições ecológicas e da flora, do semiárido. O mapa das ecorregiões do Bioma Caatinga, por exemplo, destaca o papel da Chapada Diamantina, Chapada do Araripe, Planalto da Borborema, bem como das depressões sertanejas na diversificação dos solos, formando um complexo mosaico de tipos diferente, e grande variedade de sistemas ecológicos (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002).

Localmente, os inputs climáticos são reorganizados pelo relevo que, em cooperação com os materiais superficiais, modula a distribuição e armazenamento de água na paisagem. Estas variações locais terminam por criar regimes pedogeoquímicos diferenciados (FORTESCUE, 1992), com impacto marcante sobre o desenvolvimento do conjunto solum-saprolito e na distribuição da vegetação.

Conforme a classificação climática proposta por Köppen (1931), a região semiárida Pernambucana possui um clima do tipo BSh – Semiárido quente, na maior parte de sua extensão. A região é caracterizada por apresentar altas temperaturas, forte insolação, baixos índices pluviométricos, chuvas irregulares e altas taxas de evapotranspiração potencial. Estas características contribuem para uma acentuada escassez hídrica e secas prolongadas.

De modo geral, a precipitação média anual varia de 300 a 800 mm, podendo ser mais elevadas nas matas de altitude, no planalto da Borborema e sobre as áreas mais elevadas de algumas serras, inselbergs e chapadas. Já as temperaturas, apresentam médias anuais que variam de 23°C a 27°C, com pouca variação ao longo do ano, e alta amplitude térmica diária, influenciada principalmente pelo efeito da continentalidade que também contribui para uma baixa umidade relativa do ar (MOURA et al., 2007).

Os principais sistemas atmosféricos e meteorológicos responsáveis pelas chuvas no semiárido Pernambucano são as Massas de ar Tropical Atlântica (MTA), Equatorial Continental (MEC), Equatorial Atlântica (MEA), os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), além das contribuições dos ventos alísios de nordeste no transporte de vapor e umidade que condensam e formam nuvens provocando chuvas de moderada a fortes, formações das linhas de instabilidades, orografia e suas contribuições local e regional (MEDEIROS, 2018; MOURA; SOBRINHO; SILVA, 2019).

Como resultado das condições climáticas predominantes, a maior parcela do semiárido brasileiro é ocupada pelo bioma Caatinga. Trata-se de um bioma exclusivamente brasileiro (AGBENIN; TIESSEN, 1994; SÁ; SILVA, 2010), caracterizado como uma floresta tropical seca, com vegetação xerófila composta por estratos herbáceos, arbustivos e arbóreos altamente adaptadas ao clima seco e à deficiência hídrica sazonal.

De forma geral, a cobertura vegetal do semiárido pernambucano pode ser agrupada em dois grandes tipos de caatinga: a Caatinga hiperxerófila, composta uma vegetação mais arbustiva e esparsa com forte presença de cactáceas e bromeliáceas, encontrada geralmente nos ambientes mais secos do sertão pernambucano; e a Caatinga hipoxerófila, formada por vegetação arbustivo-arbórea mais ou menos densa, com ou sem cactáceas, ocorrendo em áreas com características edafoclimáticas mais favoráveis, como a região agreste, brejos de altitude e áreas de transição entre biomas (ANDRADE, 2003; CORDEIRO; OLIVEIRA, 2010).

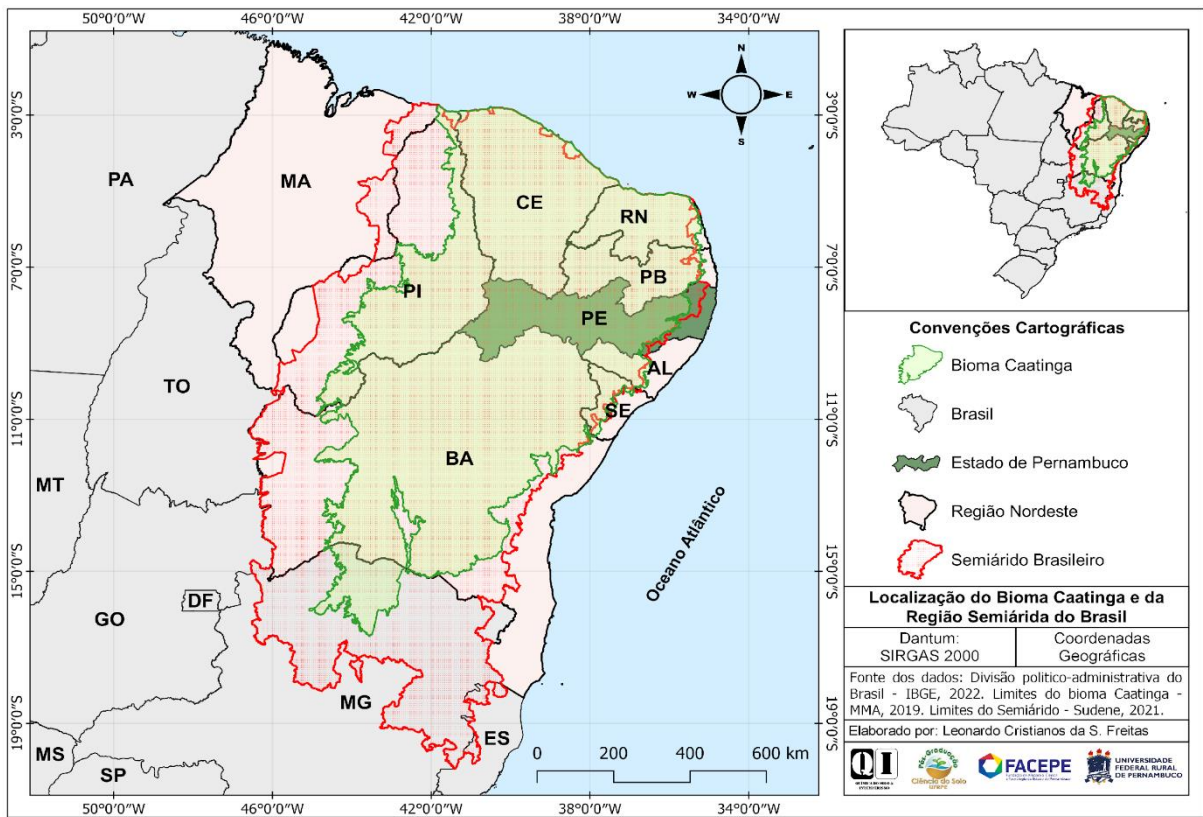
O atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil, considera como “espaços semiáridos” aquele com um Índice de Aridez (IA) entre 0,20 e 0,65, abrangendo áreas de climas semiárido, subúmidos secos e as áreas do entorno (BRITO, 2000; MMA, 2007). Essa regionalização política e oficial, do semiárido brasileiro, vai além do bioma Caatinga (Figura 2), e do clima semiárido que possui um IA entre 0,21 e 0,50 (MATALLO JÚNIOR; SCHENKEL, 2002) e tem por finalidade atender as áreas mais vulneráveis à escassez hídrica no Brasil que apresentam características comuns às áreas semiáridas.

O IA, calculado pela razão entre as médias anuais de precipitação e evapotranspiração, é amplamente utilizado para determinar regiões áridas e semiáridas do globo. Os valores do IA semiárido indicam que essas áreas apresentam de moderada a alta susceptibilidade a processos de desertificação (LOPES et al., 2017).

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), de 2019, indica que pelo menos 94% da região semiárida brasileira está sujeita à desertificação (MASSON-DELMOTTE et al., 2020). Somado a isso, o Instituto Nacional do Semiárido (INSA), revelou que 85% do Semiárido brasileiro está em processo de desertificação moderado, enquanto 9% já se encontra efetivamente desertificado, indicando que a reversão desse processo é quase impossível (INSA, 2020).

O Semiárido Brasileiro (Figura 1) é um dos mais densamente povoados do mundo, se estende pelos nove estados da região Nordeste e o norte de Minas Gerais e do Espírito Santo. No total, ocupa aproximadamente 12% do território nacional, 85% da região Nordeste e 88% do estado de Pernambuco.

Figura 1 – Localização do semiárido brasileiro e do bioma Caatinga.



Fonte: Organizado pelo autor, 2024.

Com a nova delimitação de 2021 a região passou a abrigar cerca de 28 milhões de habitantes distribuídos em 1.427 municípios entre zonas urbanas (62%) e rurais (38%) abrangendo uma área de aproximadamente 1 milhão de km² (IBGE, 2023; SUDENE, 2021).

Atualmente, o processo de desertificação no semiárido representa uma grande ameaça ambiental e socioeconômica para a região (BARBOSA et al., 2022). Somado a isso, estudos recentes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), indicam que áreas tradicionalmente consideradas semiáridas nos núcleos de desertificação de Cabrobó (PE) e do Sertão do São Francisco (BA), estão se tornando áreas áridas, o que agrava ainda mais os desafios ambientais e socioeconômicos da região (TOMASELLA et al., 2023).

Diante desse cenário, marcado por adversidades climáticas e por um histórico de desigualdades estruturais, o Semiárido concentra algumas das maiores vulnerabilidades socioeconômicas do país. Essas condições reforçam a necessidade de estudos que valorizem os recursos naturais locais e proponham estratégias sustentáveis de convivência com o clima, especialmente em áreas como o sertão pernambucano, onde o uso do solo pela agricultura familiar desempenha papel central na subsistência das comunidades.

2.2 Soluns rasos no semiárido e potencialidades

O solo é um corpo natural dinâmico, considerado um sistema aberto, tridimensional, composto por fase sólida (mineral e orgânica), líquida e gasosa, que apresentam constante interação entre si e com o ambiente em que estão inseridas, servindo de interface para o conjunto dinâmico dos geossistemas, ao conectar mundo vivo da biosfera com a litosfera, atmosfera e hidrosfera (KER et al., 2015; CHRISTOPERSON; BIRKELAND, 2017).

No sistema trifásico do solo, a fase sólida é composta por minerais (autóctones ou alóctones) e a matéria orgânica em seus vários estágios de decomposição. Já a fase líquida compreende a água presente nos poros do solo podendo ser gravitacional ou capilar. A fase gasosa é composta por gases atmosféricos como o O₂ e o CO₂, que ocupam a parte porosa do solo não preenchida por água (LEPSCH, 2021). Essas características tornam o solo um dos mais complexos sistemas naturais.

Na pedologia, o conjunto de horizontes A e B do solo é comumente denominado de solum, que pode ser descrito como a parte do solo que sofre a maior influência das plantas e animais. Abaixo do solum ocorre uma região onde as características pedológicas dos horizontes

A e B estão ausentes; esta parte do solo geralmente compreende os horizontes C ou Cr, que é a representação comumente utilizada para representar o saprolito.

As condições climáticas do semiárido pernambucano, exercem influência direta sobre os processos de formação do solo, sobretudo, daqueles formados a partir de litologias cristalinas. Essas características contribuem para o desenvolvimento de solums rasos (≤ 50 cm) e pouco profundos (> 50 cm e ≤ 100 cm), que ocupam grande extensão da região semiárida (CURI et al., 2017).

As principais classes de solos que apresentam solums rasos no semiárido pernambucano são os Neossolos Litólicos, Luvisolos Crômicos e Planossolos Háplicos e Nátricos (OLIVEIRA et al., 2009). Segundo o mapeamento de solos na escala de 1:100.000 do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE), os Neossolos Litólicos, Luvisolos e Planossolos recobrem, respectivamente, aproximadamente 15%, 10% e 19% do semiárido pernambucano (EMBRAPA, 2001).

Os Neossolos Litólicos compreendem solos com profundidade inferior a 50 cm, são solos pouco desenvolvidos pedologicamente, sem horizonte B diagnóstico definido, apresentam muitas variações morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas que estão intimamente ligadas ao material de origem, localização na paisagem e as condições climáticas locais (CURI et al., 2017). Esses solos apresentam horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr, com seu contato lítico ou lítico fragmentado, além de permitir um horizonte B incipiente, desde que não satisfaça nenhum tipo de horizonte B diagnóstico (SANTOS et al., 2018).

No contexto do semiárido, suas limitações são agravadas em decorrência do déficit hídrico e suscetibilidades a processos erosivos e a desertificação. As maiores limitações dos Neossolos Litólicos, estão relacionadas com a pouca profundidade, presença de pedregosidade e rochosidade. Apesar de sua aptidão agrícola limitada, é comum a utilização de áreas com esta classificação de solo para culturas diversas, principalmente por pequenos agricultores para agricultura familiar com lavouras temporárias e sequeiros (CURI et al., 2017).

Os Luvisolos são solos minerais, eutróficos, não hidromórficos, apresentam horizonte B textural (Bt) com cores fortes, avermelhadas ou amareladas e argilas de atividade alta, como vermiculita e esmectitas (SANTOS et al., 2018). Geralmente, são solos pouco profundos, com sequência de horizontes A, Bt e C ou Cr, podendo ou não apresentar transição textural abrupta para o horizonte B, além de possuir alta saturação por bases, e presença de minerais primários que são facilmente intemperizados (CURI et al., 2017).

No semiárido, os Luvisolos são rasos ou pouco profundos e estão associados a terrenos muito pedregosos, ocorrem em regiões com alta restrição hídrica, geralmente em áreas de relevo suave e suave ondulado. Esses solos podem apresentar horizonte vértico e caráter solódico e salino (FERNANDES et al., 2010; JACOMINE et al., 1989).

Geralmente estes solos possuem textura média, argilosa ou muito argilosa são considerados de alta fertilidade natural, no entanto são de potencial restrito por conta de algumas de suas características edáficas como pouca profundidade, alta pedregosidade e susceptibilidade a erosão, caráter solódico e salino em alguns casos e a presença de horizontes vértico ou muito argilosos (CURI et al., 2017).

Os Planossolos são solos minerais, imperfeitamente drenados, com horizonte B plânico de textura argilosa, subjacente a qualquer tipo de horizonte A ou E de textura arenosa ou média e mudança textural abrupta, com estrutura típica em blocos subangulares, angulares ou com aspectos colunar ou prismático (SANTOS et al., 2018).

No segundo nível categórico podem ser divididos em Planossolos Háplicos e Nátricos. Possuem alta saturação por bases $> 50\%$, o que lhe confere grande importância nutricional, no entanto, possui características físicas que desfavorece o manejo por apresentar consistência muito firme e extremamente firme mesmo quando úmido e rachaduras quando o solo está seco (EMBRAPA, 2023).

Os Planossolos Nátricos morfologicamente são semelhantes ao Háplico, no entanto, apresentam alta saturação por sódio trocável ($100 \text{ Na}^+ / \text{T}$) superiores a 15% e maior dispersão das argilas do horizonte B nátrico, que favorecem o desenvolvimento de estrutura prismática ou colunar (SILVA et al., 2005). Segundo a Embrapa (2023), O caráter salino do Planossolo Nátrico, concomitantemente com a saturação elevada por sódio pode torná-los inaptos para a agricultura, sendo mais recomendado para pastagem ou para compor áreas de preservação na caatinga.

Os Planossolos no geral são rasos ou pouco profundos característicos de áreas planas e suave onduladas da depressão sertaneja. São solos com horizonte B plânico (característicos dos Planossolos) geralmente com textura argilosa e muito argilosa e adensado. Além disso, possuem problemas de sais, drenagem ruim e potencial muito baixo (EMBRAPA, 2021).

Em função de suas profundidades associadas a outras características edáficas, os solums rasos são geralmente classificados como sendo de baixo potencial e impróprios para atividades agrícolas por agências financiadoras privadas, governamentais, e organizações do terceiro setor,

impedindo assim, que pequenos agricultores consigam receber suporte financeiro para investir e usufruir do seu potencial agrícola e ambiental (SANTOS, 2015; SANTOS, 2022). Além disso, ao se considerar apenas a espessura do solum pouco se revela a respeito das suas potencialidades ou limitações para qualquer tipo de uso, seja agrícola ou não.

Embora, diferentes fatores sejam reconhecidos por contribuírem para a potencialidade agrícola dos solos, a influência do saprolito abaixo de solums rasos ainda é pouco conhecida. No entanto, estudos mais recentes consideram que em ambiente de solums rasos o saprolito pode apresentar contribuições consideráveis para a nutrição vegetal, além de grande relevância ambiental (JUILLET; DONDEYNE; HISSLER, 2014; OLIVEIRA, 2003; SANTOS, 2015).

Em ambientes de solums rasos o saprolito pode proporcionar boas produções agrícolas com culturas temporárias, e até mesmo perenes (GUERRA, 2015). Além disso, o saprolito abaixo de solums rasos contribuem para o armazenamento de água através de seus microporos e fraturas, ajudando a manter a umidade do solo por um maior período, e servindo de reserva para a vegetação nativa e algumas culturas agrícolas, mesmo nos períodos de escassez hídrica (ARKLEY, 1981; GRAHAM; TICE; GUERTAL, 1994; GUERRA, 2015; STERNBERG et al., 1996; STONE; COMEFORD, 1994).

No semiárido Pernambucano, são esses solums rasos que sustentam grande parte da agricultura familiar e de subsistência dos povos e comunidades tradicionais, garantindo o sustento de milhares de famílias, e movimentando a economia de vários municípios de pequeno porte que depende principalmente da agricultura, da pecuária extensiva e do extrativismo (INSA, 2023; SÁ; SILVA, 2010).

2.3 Saprolito abaixo de solums rasos

O saprolito é definido como um material autóctone (não transportado) e isovolumétrico resultante do processo de intemperismo da rocha matriz, preservando-se seu volume e estrutura original (BECKER, 1985; SANTOS et al., 2022). A origem da palavra saprolito deriva do grego: *saprós* = podre; *litos* = rocha, o que mostra ser uma rocha já modificada “podre”.

Nos estudos ligados ao intemperismo, o saprolito pode ser denominado também pelos termos sinônimos de alterita e isalterita ambos utilizados amplamente pelo que seria uma escola francesa do intemperismo (SANTOS, 2015). Atualmente, alguns trabalhos se referem ao termo alterita como sinônimo de regolito (conjunto solo + saprolito) e a isalterita como sendo sinônimo de saprolito (DELVIGNE, 1998; GUERRA, 2015).

A formação do saprolito inicia-se ainda na rocha sã, exposta na superfície, e submetida a processos físicos, químicos e biológicos, condicionados por fatores como clima, material de origem, tempo, relevo e atividade biológica. No entanto, o saprolito pode se desenvolver abaixo de materiais alóctones submetidos aos mesmos processos e fatores de formação.

No processo de alteração da rocha originária para formação do saprolito ocorre a intemperização de minerais primários menos resistentes e a formação de minerais secundários, óxidos de ferro e fissuras, contribuindo para perda da densidade, aumento da porosidade e preservação do seu volume original (GARDNER; KHEORUENROMNE; CHEN, 1978; LAPANJE et al., 2012; MINARD, 1959; SANTOS et al., 2015).

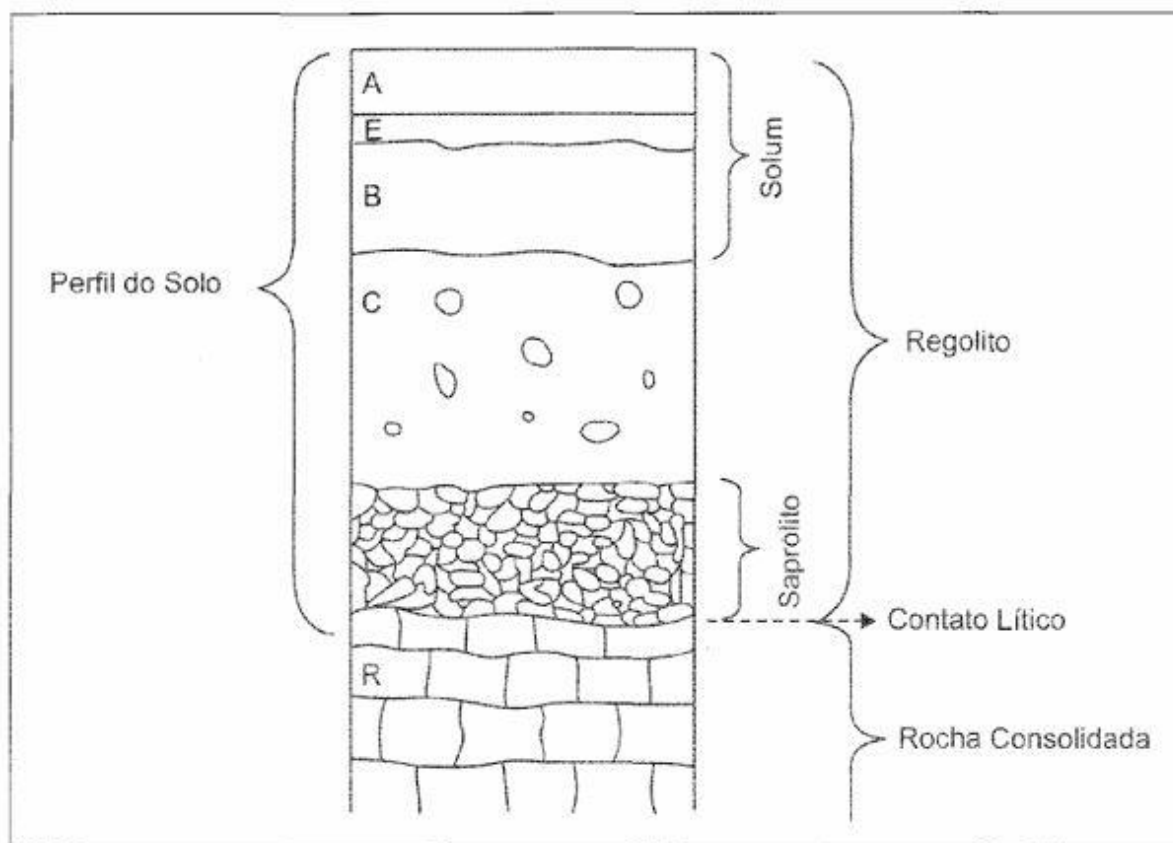
Os minerais mais resistentes ao intemperismo contribuem para que o saprolito mantenha sua estrutura “esqueleto”, o qual pode colapsar e, conseqüentemente, perder sua condição isovolumétrica dando origem a região superior do solo por meio da atuação dos processos pedogenéticos (SANTOS et al., 2018). O estudo do saprolito ao longo do tempo recebeu contribuição de várias áreas ligadas às ciências da terra e ambientais, sendo a saprolitologia uma linha de pesquisa em construção e constantemente implícita dentro de outras linhas de pesquisas.

Para Santos (2015) trazer à luz a existência da saprolitologia para toda comunidade científica resultará no reconhecimento dos esforços de muitos pesquisadores para o entendimento das regiões mais profundas do solo, além de contribuir para reconhecimento explícito da saprolitologia como uma linha de pesquisa que se dedica ao estudo do material nomeado de saprolito por Becker em 1895.

Embora os saprolitos ocorram em várias partes do mundo, poucos pesquisadores se dedicaram ao estudo de sua morfologia e gênese (BREVİK et al., 2015; MACHADO, 1997). Em muitos casos, a análise de alguns saprolitos é dificultada pela profundidade em que se encontram, tornando a coleta de amostras e a caracterização dessa camada um processo desafiador (PEDRON, 2007; STOLT; BAKER, 1994).

Entretanto, nos solums rasos, i.e., profundidade inferior a 50 cm, essa limitação é minimizada, permitindo uma análise mais completa das regiões mais profundas do perfil de solo (Figura 2). Alguns autores sugerem que o desenvolvimento de um esquema formal de classificação para o saprolito *in situ* incentivaria técnicos e pesquisadores de campo a dedicar mais atenção ao conjunto solum-saprolito, que atualmente é amplamente negligenciado (BUOL, 1989; EVANS et al., 2024; JUILLERET et al., 2016; SANTOS, 2015).

Figura 2 – Representação geral do modelo de subdivisão do regolito.



Fonte: Ker et al. (2017).

A caracterização do conjunto solum-saprolito é considerada essencial para diversas aplicações ambientais, como a ecologia da vegetação, recarga de aquíferos, qualidade da água e disposição de resíduos (JUILLERET et al., 2016). Em estágios mais avançados de intemperismo, o saprolito próximos a superfície pode ser explorado pelo sistema radicular das plantas, atuando como uma fonte de água e nutrientes, especialmente em épocas de escassez hídrica, o que reforça sua importância ecológica e agrícola (MACHADO, 1997).

A inclusão de dados sobre o saprolito nos levantamentos de solo aumentaria significativamente a relevância desses estudos, fornecendo uma visão integrada da relação entre solo, água, rocha, ar e recursos bióticos, conceito explorado na “Zona Crítica” — camada de interação essencial à vida na Terra (ANDERSON et al., 2004; JUILLERET et al., 2016; LIN, 2010).

Diferentemente do solum, o saprolito não tem sido amplamente investigado sendo tratado como uma parte distinta do solo (JUILLERET et al., 2016; WYSOCKI et al., 2005). Estudos mais aprofundados exigem inovação metodológica, o que poderia fornecer contribuições significativas para a compreensão da evolução dessa porção do solo derivada de

diferentes litologias, que desempenha um papel importante no ambiente (GRAHAM et al., 1994; MACHADO, 1997; NEVES et al., 2023; SILVA et al., 2024; SOUSA et al., 2024).

Silva et al. (2024) realizaram uma revisão cienciométrica sobre as pesquisas relacionadas ao saprolito no Brasil entre 1990 e 2022 e observaram um aumento no número de publicações ao longo desse período. Nos últimos dez anos, a média de artigos publicados anualmente foi de sete, com uma concentração significativa de estudos na região Sudeste, especialmente no estado de Minas Gerais, que representou 28,49% das publicações. Com publicações principalmente nas áreas relacionadas à ecologia e às geociências, incluindo estudos terrestres e marinhos. No entanto, os trabalhos também foram citados em outras áreas do conhecimento, como saúde e políticas públicas, evidenciando a relevância interdisciplinar do saprolito.

Ainda que o saprolito tenha papel importante na aptidão agrícola dos solos, no crescimento vegetal e na conservação de recursos naturais, como a água e o carbono, seus efeitos sobre os solums rasos, especialmente em condições semiáridas como as do sertão pernambucano, permanecem pouco explorados. Esse cenário reforça a necessidade de ampliar os estudos voltados à interface entre saprolito, solums rasos e potencial agroambiental em regiões de elevada vulnerabilidade socioambiental.

2.4 Atributos Químicos, físicos, mineralógicos e morfológicos de saprolitos

O estudo do saprolito abaixo de solums rasos é de fundamental importância para o entendimento de sua gênese, morfologia e dos seus atributos físicos, químicos e mineralógicos, além de contribuir para um maior conhecimento do solo. Estudos recentes têm revelado contribuições significativas dos atributos do saprolito para a potencialidade agrícola e ambiental dos solos (GUERRA, 2015; SANTOS et al., 2018; SANTOS et al., 2022).

Nesse contexto, as condições climáticas do semiárido pernambucano favorecem o desenvolvimento de solums rasos (MONGER et al., 2005; SILVA et al., 2024), principalmente em litologias cristalinas, bem como a formação de argilominerais 2:1 que podem ser encontrados ao longo de todo perfil de solo.

No saprolito, esses argilominerais se formam inicialmente através do intemperismo dos minerais menos resistentes como piroxênios e biotitas, podendo evoluir para uma assembleia mineralógica mais diversa. Além disso, esses minerais contribuem para o revestimento das porosidades presentes, fornecendo elementos químicos e nutrientes essenciais para os vegetais (KAMPF et al., 2009; MURPHY et al., 1998; SANTOS, 2019).

Santos et al. (2022), ao analisar a mineralogia e a geoquímica do solo em um gradiente climático no semiárido pernambucano identificou diferentes vias e índices de intemperismo dos minerais de feldspatos potássicos, plagioclásios, biotita e hornblenda, sendo o intemperismo mais desenvolvido no clima mais úmido. Embora tenham sido identificadas semelhanças nos minerais secundários formados, nos ambientes mais úmidos as vias de intemperismo favoreceram a formação de óxidos de ferro e argilominerais do tipo 1:1, enquanto em ambientes mais secos predominam os filossilicatos 2:1. Essa variação ajuda a compreender o comportamento do intemperismo em diferentes unidades de paisagem no semiárido.

A importância da água no processo de intemperismo também é observada em outras regiões. Buol e Weed (1991) ao estudar a zona saprolítica proveniente de gnaisse granítico na Carolina do Norte, observaram a diminuição do intemperismo devido à lenta percolação da água entre o conjunto solum-saprolito, mesmo em áreas onde a precipitação anual supera a evapotranspiração. Essa relação entre dinâmica hídrica e intemperismo reforça a importância do saprolito na compreensão da evolução dos perfis de solo.

Nesse sentido, Câmara et al. (2021) ressaltam que as variações nos teores de minerais máficos podem resultar na formação de solos com diferentes atributos morfológicos, químicos, físicos e mineralógicos, resultando em maior diversificação de classes de solos e variações nos horizontes saprolíticos. Essas características também afetam o comportamento do sistema radicular.

As fraturas, presentes no saprolito são geralmente revestidas por argilas e facilitam o desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais, o que contribui positivamente para o potencial agrícola e ambiental do regolito, principal abaixo de solos rasos (KRETZSCHMAR; ROBARGE; AMOOZEGAR, 1995; SANTOS et al., 2018; SANTOS et al., 2022; WILLIAMS; VEPRASKAS, 1994)

Estudos recentes no âmbito geoambiental têm relatado a relevância do saprolito e seus atributos na formação das camadas mais superficiais do solo e para a zona crítica, tendo em vista, que geralmente o saprolito abrange a interface entre o manto rochoso consolidado e o solum, e contribuem para a retenção e liberação de nutrientes e até mesmos para a retenção de contaminantes, sendo tão importante quanto o solum subjacente (CÂMARA et al., 2021; COSTA et al., 2018; IPCC, 2005; KEIM et al., 2015; RICHTER; BILLINGS, 2015; SANTOS et al., 2018; SILVA et al., 2017).

Sousa et al. (2024) analisaram o estoque de carbono em Planossolos ao longo de um gradiente de precipitação no Nordeste do Brasil. Os autores observaram que o carbono orgânico do solo presente no saprolito, abaixo de 30 cm, pode representar a maior fração do COS total em muitos solos. Contudo, ainda são escassos os estudos que investigam o potencial desses solums rasos e respectivos saprolitos para o armazenamento de COS, considerando diferentes condições climáticas.

Segundo Santos (2015), os saprolitos, independentemente de sua estrutura, apresentam importância agrícola e ambiental comparável à dos solums subjacentes. Evidências micromorfológicas e geoquímicas indicam que, além de sua contribuição para a retenção de nutrientes e suporte ao crescimento das plantas, os macroporos presentes nos saprolitos desempenham um papel crucial no movimento da água no perfil. Durante regimes saturados, esses macroporos atuam como vias preferenciais para o fluxo hídrico, o que, embora favoreça a recarga de aquíferos.

Vale ressaltar que a importância ambiental do solo engloba desde seus horizontes mais superficiais até a frente de intemperismo em contato com a rocha mãe (KRETZSCHMAR; ROBARGE; AMOOZEGAR, 1995; RICE; BUOL; WEED, 1985; SANTOS, 2015). Por isso, a avaliação dos atributos físicos, químicos e mineralógicos, separadamente ou em conjunto, são essenciais para o entendimento do “*status*” do solo, auxiliando o agricultor na compreensão de sua qualidade e funcionalidade.

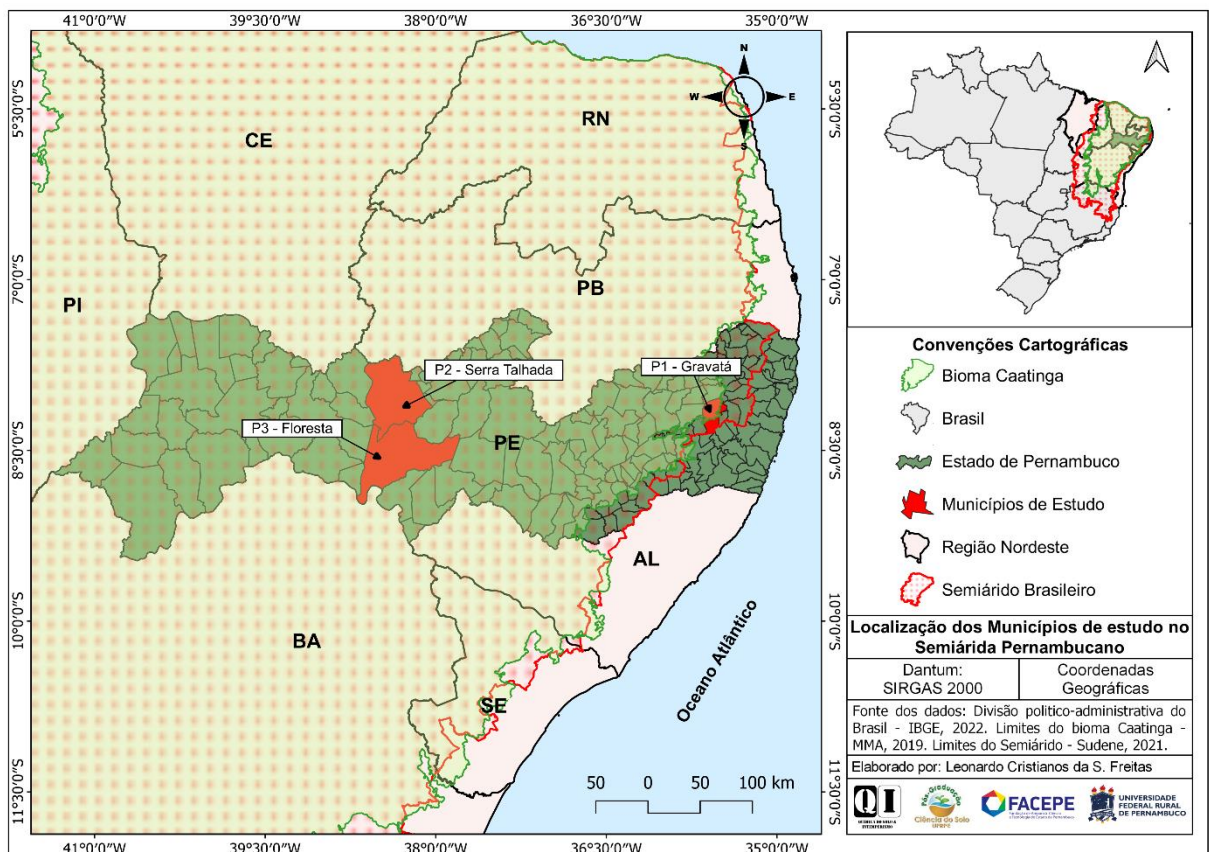
3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

As áreas de estudos estão localizadas na região fitogeográfica do semiárido pernambucano, mais especificamente, nos municípios de Gravatá (agreste pernambucano), Serra Talhada (sertão pernambucano), e Floresta (sertão do são Francisco). Em cada município foram escolhidas áreas de solums rasos representativas para coletas (Figura 3).

Áreas de relevância socioeconômicas foram priorizadas na seleção dos pontos de amostragem, a exemplo do perfil no município de Floresta localizado no núcleo de desertificação de Cabrobó, além das áreas de pequenos agricultores familiares nos municípios de Gravatá e Serra Talhada.

Figura 3 – Mapa de localização com as espacializações dos perfis de coletados no semiárido pernambucano.



Fonte: Organizado pelo autor, 2024.

A distribuição dos pontos visou representar solums rasos em litologias cristalinas mais representativas do semiárido pernambucano, além de classes de solos características da região (Neossolo, Planossolos e Luvisolos) e a variação do clima semiárido do Estado de

Pernambuco, desde um semiárido mais brando no agreste até um semiárido mais severo no sertão do São Francisco.

3.2 Caracterização geoambiental

Quanto às características geoambientais, o P1 está inserido na unidade geomorfológica das encostas orientais do planalto da Borborema, em um relevo com dissecação estrutural de topo convexo, a uma altitude de 370 metros, com declividade média de 20%, variando de ondulada a forte ondulada. Geologicamente, área faz parte da zona transversal do planalto da Borborema, no arcabouço geológico da unidade Complexo Orobó 1, onde predominam litotipos como Anfibolitos e Ortognaisses (CPRM, 2004), sendo o xisto o principal no perfil.

A precipitação média anual é de 725 mm, com maior regime de chuvas nos meses de junho e julho e o menor entre outubro e novembro. A temperatura média anual varia de 16° a 26°. A vegetação do entorno é do tipo hipoxerófila, com caatinga arbórea e arbustiva densa, e o uso da terra majoritariamente destinado à cultura do abacaxi por pequenos e médios produtores, intercalado com outros mosaicos de agricultura e pastagem.

Geomorfologicamente, o perfil 2 encontra-se inserido na unidade geoambiental da depressão sertaneja meridional, a uma altitude de 435 metros, em relevos planos a suave ondulados, com declive médio de 3% e dissecação homogênea convexa/diferencial. O arcabouço geológico da área é dominado pelos litotipos granitos e granodioritos, pertence à unidade litoestratigráfica Suíte Intrusiva Itaporanga, do subdomínio alto pajeú, na zona transversal da Borborema (LIMA et al., 2018).

A precipitação anual é de 686 mm, com maiores índices pluviométricos de dezembro a abril, enquanto o período mais seco é de julho a novembro. As temperaturas mínimas e máximas médias variam de 19°C a 32°C, respectivamente. A vegetação nativa é do tipo hiperxerófila, com Caatinga Arbustiva Aberta. O uso da terra na área do perfil é dominado por pastagem plantada para pecuária extensiva de bovino, enquanto o entorno é composto por mosaicos de agricultura de sequeiro e sobrepastoreio de caprinos, ovinos e bovinos.

A geomorfologia da área é dominada por aplainamentos na categoria dos pediplanos retocado desnudado da depressão sertaneja meridional. Localmente, o relevo apresenta um declive médio de 8%, caracterizado por terrenos suaves-ondulados a ondulados, situados a uma altitude de 340 metros. A área está inserida na unidade litoestratigráfica Complexo São Caetano, no subdomínio Alto Pajeú, com litotipo predominante de Biotita-muscovita-quartzo xisto, entre outros característicos do metamorfismo regional (LIMA et al., 2018).

O P3 está inserido na área mais seca, com precipitação anual de 554 mm, sendo os maiores índices pluviométricos registrados entre dezembro e abril, e o período mais seco entre junho e outubro. As temperaturas mínimas e máximas médias variam entre de 20°C a 33°C.

A vegetação dominante é a Caatinga Arbustiva Esparsa, intercalada por um estrato mais baixo de plantas herbáceas, incluindo gramíneas. O uso da terra no local é majoritariamente voltado para a pecuária extensiva de caprinos e ovinos por meio do sobrepastoreio; No entorno, observa-se a presença de agricultura de sequeiro e Sistemas Agroflorestais (SAFs), cultivados por pequenos agricultores.

3.2 Procedimentos metodológicos

3.2.1 Coleta das amostras

As amostras foram coletadas seguindo as metodologias propostas no Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (SANTOS et al., 2015). Para o presente estudo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, tanto dos horizontes do solum, e.g., A e B, quanto dos horizontes do saprolito, e.g., Cr.

Para a escavação dos perfis de solo, foram seguidos os critérios propostos por Buol (1994), adaptando as ferramentas utilizadas conforme a dureza dos horizontes. Nos horizontes mais friáveis, com baixa e moderada dureza, foi utilizada uma pá reta. Para os horizontes de maior dureza, classificados como de alta a muito alta resistência, utilizou-se uma picareta chibanca, ferramenta mais robusta e adequada para romper os horizontes saprolíticos, facilitando a escavação.

As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de um martelo pedológico, sendo recolhidas em bandeja plástica e depois separadas em sacos plásticos devidamente identificados para as análises mineralógicas, físicas e químicas de cada perfil. As amostras indeformadas, destinadas à análise da densidade do solo, foram cuidadosamente embrulhadas em bolha plástica e armazenadas em caixas de isopor para preservação até o momento das análises.

3.2.2 Classificação e descrição morfológica do solo e saprolito

Os horizontes do solum foram descritos morfológicamente de acordo com Santos et al. (2015) e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). É importante ressaltar que nessa dissertação denominaremos solum como o conjunto dos horizontes A e B, saprolito como os horizontes Cr e solo (ou regolito) como o conjunto solum-saprolito.

Os saprolitos foram descritos morfologicamente por Santos et al. (2015) e por um sistema de descrição em construção denominado “Chimera: A Hybrid System for Morphological Description of Saprolite Horizons” e classificados segundo o “subsolum reference group” (JUILLET et al., 2016). É importante ressaltar que nessa dissertação denominaremos solum como o conjunto dos horizontes A e B, saprolito como os horizontes Cr e solo (ou regolito) como o conjunto solum-saprolito.

3.2.2.1 Horizontes do saprolito e camada de rocha

Os atributos estrutura, textura e consistência não podem ser completamente descritos nos horizontes do saprolito ou camada de rocha pelos critérios convencionalmente utilizados na descrição morfológica de horizontes do solo. O saprolito é caracterizado pela preservação parcial da estrutura, textura e volume da rocha originária. Por isso, a utilização de critérios petrográficos são mais apropriados para descrever a textura e estrutura de horizontes do saprolito e camada de rocha. Em adição, a determinação do grau de coesão para saprolito e rocha substitui adequadamente o atributo consistência, que dificilmente pode ser determinado nesses materiais.

Após separar o horizonte do saprolito e determinar a sua espessura e cor pelos critérios descritos para os demais horizontes do solum, propõe descrever a Textura, Estrutura e Grau de Coesão para Saprolito (GCS) de acordo com os critérios dos atributos A, B, C e D apresentado no Quadro 1. Posteriormente, a transição entre horizontes do saprolito deverá ser descrita pelos critérios já utilizados para horizontes do solo. Essa sequência também pode ser aplicada para camada de rocha, retirando-se a descrição da transição.

A descrição dos poros da matriz, ou seja, poros presentes no interior da estrutura consolidada sem fragmentação dessa estrutura, deve ser baseada nos seguintes critérios em uma área de 10 x 10 cm (unidade área): 1) Porcentagem da superfície ocupada pelos poros da matriz, e 2) Tamanho (diâmetro) dos poros da matriz (item D, Quadro1)

A descrição de poros não matriciais, ou seja, fraturas e outros tipos de poros que atravessam, quebram ou fragmentam a estrutura consolidada, deve ser feita na totalidade da superfície exposta do horizonte do saprolito ou da camada de rocha de acordo com as seguintes critérios do Quadro 1: 3) Forma dos poros não matriciais; 4) Tamanho (diâmetro ou espessura) dos poros não matriciais; 5) Abundância de poros não matriciais por unidade de área e 6) Continuidade de poros não matriciais (Canais e Fraturas).

Quadro 1 – Critérios para classificação e descrição de horizontes do saprolito e camada de rocha.

Atributo	Critérios	Classe	Descrição / exemplo
A - Textura	1 - Para horizontes de saprolitos derivados de rochas cristalinas	Afanítica	Nenhum mineral primário remanescente é identificado a olho nu por apresentar tamanhos inferiores a 0,5 mm, ex., saprolitos derivados de basalto ou ardósia.
		Subfanerítica	Apenas alguns minerais primários remanescentes são identificados a olho nu por apresentarem tamanhos superiores a 0,5 mm, ex., saprolitos derivados de diabásio.
		Fanerítica	Todo mineral primário remanescente é identificado a olho nu por apresentar tamanhos superiores a 0,5 mm, ex., saprolitos derivados de granito ou gnaisse.
	2 - Para horizontes de saprolitos derivados de rochas sedimentares	Rudácea	Predomina a fração areia com seixos ou cascalhos, ex., saprolitos derivados de conglomerados.
		Arenosa	Predomina a fração areia sem seixos ou cascalhos, ex., saprolitos derivados de arenitos.
		Siltosa	Predomina a fração silte, ex., saprolitos derivados de siltitos e folhelho
		Argilosa	Predomina a fração argila, ex., saprolitos derivados de argilitos.
		Fina	Ausência de granulação aparente, ex., saprolitos derivados de calcários e outras rochas sedimentares químicas.
B - Estrutura	1 - Para horizontes de saprolitos derivados de rochas ígneas	Maciça	Os minerais primários são muito pequenos, impossibilitando a visualização do arranjo a olho nu. Estrutura típica de saprolitos com textura afanítica, ex., saprolitos derivados de basalto.
		Granular fina	Os minerais primários apresentam tamanhos reduzidos e o arranjo é dificilmente distinguível, exceto pela sensação de aspereza ao tato. Estrutura típica de saprolitos com textura subfanerítica, ex., saprolitos derivados de diabásio.
		Granular grossa	Os minerais primários são evidentes a olho nu, sem desenvolvimento preferencial e apresentam aproximadamente o mesmo tamanho. Estrutura típica de saprolitos com textura fanerítica, ex., saprolitos derivados de sienito.

		Porfirítica	Presença de fenocristais que se destacam da matriz vítrea, granular fina ou granular grossa da rocha pelo tamanho, ex., saprolitos de granitos porfiríticos.
		Pegmatítica	Predomínio de cristais com dimensões superiores a 1 cm e sem desenvolvimento preferencial, ex., saprolitos derivados de pegmatitos.
		Vesicular	Presença de um grande número de vacúolos, vesículas ou bolhas herdadas do rápido resfriamento do magma durante a formação da rocha originária, ex., saprolitos derivados de basalto vesicular.
		Amigdalóide	Presença de vesículas parcial ou totalmente preenchidas por minerais, ex., saprolitos derivados de basalto amigdaloidal.
	2 - Para horizontes de saprolitos derivados de rochas metamórficas	Maciça	Os minerais primários são muito pequenos, impossibilitando a visualização do arranjo a olho nu. Estrutura típica de saprolitos com textura afanítica, ex., saprolitos derivados de quartzitos.
		Gnáissica	Interação de estruturas granulares e xistosas resultando em bandamentos alternados ricos em minerais equidimensionais e planares, ex., saprolitos derivados de gnaisses.
		Xistosa	Acentuado aspecto planar e fissilidade ao longo de planos paralelos, ex., saprolitos derivados de biotita xisto.
		Cataclástica	Presença de fragmentos angulosos de minerais com diversos tamanhos envoltos em uma massa cataclástica fina, ex., saprolitos derivados de cataclasitos.
		Granular	Minerais bem evidentes com tamanho equivalente e ausência de qualquer orientação, ex., saprolitos derivados de mármore branco.
		Foliar	Presença de fissilidade, diferenciando-se da estrutura xistosa por apresentar minerais de menores tamanho. Estrutura típica de saprolitos com texturas afaníticas ou subfaneríticas, ex., saprolitos derivados de filitos ou ardósia.
		Migmatítica	Distribuição irregular de neossomas claros com composição granítica e paleossomas escuros constituídos predominantemente de biotita e anfibólios, ex., saprolitos derivados de migmatitos.

	3 - Para horizontes de saprolitos derivados de rochas sedimentares	Maciça	Os minerais primários são muito pequenos, impossibilitando a visualização do arranjo a olho nu. Estrutura típica de saprolitos com textura fina, ex., saprolitos derivados de siltitos.
		Terrosa	Predomínio da fração argila. Estrutura típica de saprolitos com textura argilosa, ex., saprolitos derivados de argilito.
		Granular	Predomínio da fração areia com ou sem seixos ou cascalhos. Estrutura típica de saprolitos com textura arenosa, ex., saprolitos derivados de arenitos ou conglomerados.
		Estratificada	Ocorrência de: a) estratificação em horizontes planas paralelas, b) estratificação em folhas ou placas e c) estratificação em horizontes cruzadas, ex., saprolitos derivados de folhelho (estratificada em folhas) ou calcário dolomítico (estratificada em horizontes).
		Brechóide	Ocorrência de: a) estratificação em horizontes planas paralelas, b) estratificação em folhas ou placas e c) estratificação em horizontes cruzadas, ex., saprolitos derivados de folhelho (estratificada em folhas) ou calcário dolomítico (estratificada em horizontes).
		Brechóide	Predomínio de fragmentos das mais variadas litologias cimentados por sílica e/ou carbonatos, ex., saprolitos derivados de tilito.
C - Grau de Coesão para Saprolito ou Rocha	1 - Resposta da estrutura do saprolito ou rocha ao teste	1° - Pouquíssimo coesa	Pode ser escavada com a mão.
		2° - Pouco coesa	1° teste inválido e pode ser escavada com a faca pedológica.
		3° - Moderadamente coesa	2° teste inválido e pode ser escavada com o martelo pedológico.
		4° - Muito coesa	3° teste inválido e pode ser escavada com a pá reta.
		5° - Extremamente coesa	1°, 2°, 3° e 4° testes inválidos.
D - Porosidade	1 - Porcentagem da superfície ocupada pelos poros da matriz:	a. Muito baixa	Menos de 5%;
		b. Baixa	De 5 a menos de 10%;
		c. Média	De 10 a menos de 20%;
		d. Alta	De 20 a menos de 40%;
		e. Muito alta	40% ou mais.
		a. Muito fino	Menos de 1,0 mm;

	2 - Tamanho (diâmetro) dos poros da matriz:	b. Fino	De 1,0 a menos de 2,0 mm;
		c. Médio	De 2,0 a menos de 5,0 mm;
		d. Grosso	De 5,0 a menos de 10,0 mm;
		e. Muito grosso	De 10 mm ou mais.
	3 - Forma dos poros não matriciais:	a. Vesiculares	Poros esféricos ou elípticos;
		b. Irregulares	Poros irregulares e equidimensionais;
		c. Canais	Poros alongados, tubulares e contínuos;
		d. Fraturas	Poros angulares e alongados acomodando e separando fragmentos da estrutura.
	4 - Tamanho (diâmetro ou espessura) dos poros não matriciais:	a. Muito fino	Menos de 2,0 mm;
		b. Fino	De 2,0 a menos de 5,0 mm;
		c. Médio	De 5,0 a menos de 10,0 mm;
		d. Grosso	De 10,0 a menos de 20,0 mm; e. Muito grosso: 20 mm ou mais.
	5 - Abundância de poros não matriciais por unidade de área:	a. Poucos	De 1 a menos de 5 poros;
		b. Comuns	De 5 a menos de 10 poros;
		c. Muitos	10 ou mais poros.
	6 - Continuidade de poros não matriciais (Canais e Fraturas):	a. Baixa	Menos de 5,0 cm;
		b. Moderada	De 5,0 a menos de 10,0 cm;
		c. Alta	De 10,0 a menos de 50,0 cm;
		d. Muito alta	50 cm ou mais.

Fonte: Adaptado de Santos et al., 2022. (em processo de publicação).

3.2.3 Presenças de raízes no conjunto solum-saprolito

A Densidade Radicular por Massa (DRM) foi analisada de acordo com Santos et al. (2022). Primeiramente, uma amostra padrão de 0,1 kg de solo foi separada e submetida à tamisação para separar as raízes do solo, utilizando uma peneira de malha de 0,053 mm, que permitiu a remoção das partículas finas do solo e a coleta das raízes presentes. Após o peneiramento, as raízes foram lavadas para remover resíduos de solo e em seguida secas em estufas a uma temperatura constante de 60°C, para garantir a remoção completa da umidade. Por fim, as raízes foram pesadas em balança de precisão para determinar a massa seca radicular, por meio da equação 1:

$$DRM (g/kg) = \frac{\text{massa das raízes, seca à } 60^{\circ}\text{C (g)}}{\text{massa do solo (g)}} \quad (Eq. 1)$$

3.2.4 Análises físicas

As análises físicas foram realizadas segundo o Manual de métodos de análise de solo da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017), foram determinados os seguintes atributos: a) frações granulométricas, b) densidade do solo (Ds), c) densidade das partículas (Dp), d) teor de argila dispersa em água (ADA), e) grau de floculação (GF) e f) porosidade.

A determinação das frações granulométrica ocorreu por meio do método da Pipeta, no qual, inicialmente, foi realizado o pré-tratamento das amostras com o destorroamento do solo e do saprolito, seguido do peneiramento com uma peneira de malha de 2mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar – TFSA.

Em seguida, as amostras de 50g de TFSA foram adicionadas em garrafas pet de 500 ml. As amostras destinadas a determinação do teor de argila dispersa em água (ADA) receberam 125 ml de água destilada, enquanto, as amostras de argila total (AT) receberam 100 ml de água destilada mais 25 ml do dispersante Calgon, visando a dispersão total das amostras. Posteriormente, todas as garrafas (ADA e AT) foram adicionadas no agitador de partículas do tipo Wagner por 16 horas à 50 rotações por minuto.

A etapa seguinte consistiu na transferência das amostras para provetas de 1000 ml, e preenchimento com água destilada. Seguindo com os procedimentos, a solução de cada amostra passou por uma agitada por 30 segundos, com um bastão de madeira antes de marcar o tempo de decantação.

Após o tempo de decantação foi inserida uma pipeta volumétrica de 50 ml, em uma profundidade de 2 cm e com o auxílio de um pipetador manual (pêra) retirando-se 50 ml da solução, em cada proveta específica, conforme o tempo predeterminado. O mesmo procedimento foi realizado na prova em branco que conteve apenas o dispersante utilizado em uma proveta de 1000 ml.

As alíquotas coletadas foram transferidas para um recipiente de alumínio (lata), identificadas e de massa conhecida, encaminhadas para estufa a 105°C, por 24 horas. Após a secagem as latas com as amostras foram colocadas em dessecador para esfriar, sem absorver umidade do ambiente, e posteriormente pesadas em balança analítica para obtenção do valor real da amostra depois que subtrair o peso da lata, e assim foi determinado a fração argila (Eq. 2).

$$\text{Argila (g/kg)} = \frac{\text{massa de argila peneirada, seca à } 105^{\circ}\text{C}}{\text{massa TFSE (g)}} \times 1000 \quad (\text{Eq. 2})$$

Para determinar a fração de areia, todo o conteúdo restante de cada proveta de argila total, separadamente, passou por uma peneira de 0,053 mm na qual ocorreu a lavagem do material retido na malha da peneira com água corrente, até total remoção do silte e argila, ficando apenas a fração areia. Posteriormente, o material retido na malha foi transferido, com o auxílio de uma piceta para uma lata de alumínio, identificada e com peso conhecido, e levado para secagem em estufa a 105°C, por 24 horas.

Após a secagem as latas com as amostras passaram pelo dessecador até esfriar, sem absorver umidade do ambiente, depois foram pesadas em balança analítica para obter o valor real da amostra, após subtrair o peso da lata, foi obtido a fração areia (Eq. 3).

$$\text{Areia (g/kg)} = \frac{\text{massa de areia peneirada, seca à } 105^{\circ}\text{C}}{\text{massa TFSE (g)}} \times 1000 \quad (\text{Eq. 3})$$

De posse dos valores de areia e argila, o silte foi determinado por diferença (Eq. 4). Por fim, foi montado o triângulo textural com as classes texturais de cada amostra.

$$\text{Silte (g/kg): } 1000 - (\text{argila} + \text{areia}) \quad (\text{Eq. 4})$$

A partir dos dados da AT e ADA foi possível calcular o grau de floculação, (Eq. 5).

$$G_{Flo} = \frac{(AT - ADA)}{ADA} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

G_{Flo} : grau de floculação, %;

AT : concentração de argila total, em $g\ kg^{-1}$;

ADA : concentração argila dispersa em água, $g\ kg^{-1}$.

A densidade do solo e do saprolito (DS) foram determinadas pelo método do torrão parafinado, onde, os agregados do solo e do saprolito foram pesados, impermeabilizados por parafina líquida a 60°C, pesados e mergulhados em água para aferição do volume do conjunto. Por fim, com a obtenção da massa e do volume foi possível calcular a densidade ($g\ cm^{-3}$) por meio da equação 6:

$$Ds = m(s)/V(s) \quad (Eq. 6)$$

A densidade de partículas foi realizada pelo método do balão volumétrico, utilizando-se três repetições. Primeiramente, foram pesadas 20 gramas de TFSA diretamente no balão volumétrico de 50 ml, com massa conhecida. Em seguida, foi adicionado álcool etílico 96°GL, lentamente com o auxílio da bureta, no balão contendo a amostra até preencher o volume do balão, aferindo-se o volume de álcool gasto. Com os valores da massa de solo seco da amostra (ma), do volume total do balão (Vt) e volume de álcool utilizado para completar o balão (Vu), foi calculado a $Dp\ g\ cm^{-3}$ das amostras, por meio da equação 7:

$$Dp = ma / (Vt - Vu) \quad (Eq. 7)$$

Já a porosidade total (P) será calculada a partir dos valores das densidades de partículas e densidade do solo e do saprolito seguindo a equação 8:

$$P (\%) = (1 - Dss/Dp) * 100 \quad (Eq. 8)$$

3.2.5 Análises químicas

As análises químicas das amostras de solum e saprolito seguiram os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017). Foram determinados os seguintes atributos: a) pH em água e em KCl, b) carbono orgânico, c) fósforo disponível, d) cálcio, magnésio, potássio, sódio e alumínio trocável, e) acidez potencial (H^+Al), f) soma de base, g) saturação por bases, h) saturação por alumínio, i) capacidade de troca de cátions potencial, j) capacidade de troca de cátions efetiva e, k) percentual de sódio trocável (PST).

a) Determinação do pH: o pH foi medido em água e em solução de KCl (1 mol L⁻¹), utilizando uma relação solo-líquido de 1:2,5. As amostras foram agitadas e deixadas em contato por 1 hora antes da medição.

b) Carbono orgânico (CO): os teores de carbono orgânico foram determinados pelo método de Walkley-Black, que envolve a oxidação do carbono com uma solução de dicromato de potássio (0,4 mol L⁻¹) em meio ácido a 175°C, seguida de titulação com sulfato ferroso amoniacal (0,1 mol L⁻¹).

c) Fósforo disponível (P): o fósforo foi extraído utilizando o reagente ácido Mehlich-1 e quantificado por colorimetria.

d) Cátions trocáveis (cálcio, magnésio, sódio, potássio e alumínio): esses elementos foram extraídos com solução de cloreto de potássio (1 mol L⁻¹), na proporção de 1:10 entre solo e extrator. O cálcio e o magnésio foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, enquanto o alumínio foi determinado por titulação usando NaOH (0,025 mol L⁻¹). O potássio e o sódio foram extraídos também com Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama.

e) Acidez potencial ((H + Al): a acidez potencial foi obtida por extração com solução tamponada de acetato de cálcio (0,5 mol L⁻¹), sendo titulada com uma solução de hidróxido de sódio (1 mol L⁻¹).

f) Soma de base (SB): a soma das bases em mmol_c kg⁻¹ foi calculada com por meio da equação 9:

$$SB = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+}) \quad (Eq. 9)$$

g) Saturação por bases (V): a saturação por bases foi obtida por meio da equação 10:

$$V = 100 \times S.B / T \quad (Eq. 10)$$

h) Saturação por alumínio (m): saturação por alumínio foi obtida com a equação 11:

$$m = 100 \times Al^{3+} / (S.B + Al^{3+}) \quad (Eq. 11)$$

i) Capacidade de troca de cátions potencial (T): a CTC a pH 7,0 em mmol_c kg⁻¹ foi obtida pela equação 12:

$$T = SB + (H^{+} + Al^{3+}) \quad (Eq. 12)$$

j) Capacidade de troca de cátions efetiva (t): a CTC efetiva foi calculada seguindo a equação 13:

$$T = SB + Al^{3+} \quad (Eq. 13)$$

k) Percentual de sódio trocável (PST): o PST das amostras foi obtido por meio da equação 14:

$$PST = 100 \times Na^+ / T \quad (Eq. 14)$$

3.2.6 Diferentes tratamentos da TFSA do saprolito

Ao se estudar o saprolito, constata-se uma grande dificuldade em tratar as amostras coletadas no campo para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) necessária para as análises químicas, físicas e mineralógica de rotina. Há uma demanda relevante para o esclarecimento se diferentes formas de macerar os fragmentos de saprolito obtidos no horizonte Cr resultam em diferentes valores para os atributos a serem determinados nas análises.

Nesse contexto, realizamos um estudo para avaliar se diferentes forças aplicadas nos fragmentos de saprolitos implicam em variação significativa dos valores dos atributos químicos e físicos das análises de rotina. Objetive-se, com isso, observar se diferentes tratamentos na maceração do saprolito resultam em diferenças significativas dos resultados obtidos e não se esses resultados são agronomicamente representativos. Essa representatividade agrônômica precisará ser avaliada em futuros estudos que estão sendo idealizados.

As amostras de saprolito foram submetidas a três tipos de tratamento para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA): sem desagregação (SDE); desagregação total (DET) e desagregação parcial (DEP).

Para as amostras submetidas ao tratamento SDE, foi considerado apenas o material que já foi naturalmente desagregado durante a coleta em campo, não sendo necessário uma desagregação mecânica. As amostras foram peneiradas em uma peneira de 2 mm para obtenção da TFSA, e o material retido na peneira foi descartado.

No tratamento DET, toda a amostra coletada em campo foi desagregada mecanicamente. Para isso, utilizou-se um tapete de borracha sobre uma bancada, onde pequenas porções da amostra foram cuidadosamente desagregadas com a ajuda de um martelo de borracha e um martelo de aço, desintegrando completamente o material, exceto alguns grãos de quartzo, mais resistentes. Em seguida, a amostra foi peneirada para obtenção da TFSA.

As amostras submetidas ao tratamento DEP foram adicionadas em uma bandeja plástica média (dimensões 35 x 29 x 7 cm), e submetidas a uma desagregação manual com força moderada com as mãos. Ao final desse processo, a amostra foi peneirada na peneira de 2 mm, e o material retido na peneira foi descartado.

Após a obtenção da TFSA por meio dos diferentes tratamentos as amostras foram condicionadas em potes plásticos de 500 ml e submetidas as análises químicas e físicas de rotina, seguindo os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017).

3.2.6.1 Testes de Variação

Para avaliar a variabilidade dos tratamentos, apliquem-se as seguintes análises: a) Teste de Normalidade Shapiro-Wilk: inicialmente, todas as variáveis foram submetidas ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificar a adequação dos dados à distribuição normal. b) análise de variância (ANOVA): quando necessário, foi realizado o teste de variância de Fisher para detectar diferenças importantes entre os tratamentos. c) teste de Tukey para comparação de médias: Após a ANOVA, aplicou-se o teste de Tukey para avaliar as diferenças e semelhanças entre as médias dos tratamentos. Todos os testes estatísticos foram realizados com um nível de significância de 5%, utilizando o software Sisvar para análise.

3.2.7 Análises geoquímicas

Para as análises geoquímicas, as amostras foram maceradas e tamisadas sucessivamente até que todas as partículas atingissem dimensões inferiores a 0,075 mm (200 Mesh), garantindo homogeneização adequada para a análise.

A determinação dos elementos químicos Al_2O_3 , BaO , CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , P_2O_5 , K_2O , SiO_2 , SrO e TiO_2 foi realizada por meio da Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF), utilizando um analisador de fluorescência de raios-X. Essa técnica é multielementar e não destrutiva, permitindo a entrega de informações qualitativas e quantitativas sobre a composição elementar das amostras.

A ausência dos elementos magnésio (Mg), sódio (Na) e fósforo (P) nos resultados da análise por Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF) pode ser atribuída a limitações técnicas do próprio método. Assim, a não detecção desses elementos nos espectros obtidos não indica necessariamente sua ausência no solo, mas sim a incapacidade do método em identificá-los de forma eficiente.

3.2.8 Análises mineralógicas

A assembleia mineralógica das frações de areia, silte e argila foi comprovada por Difração de Raios-X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu XRD 6000, operando com tubo de cobre (Cu) a 40 kV e 30 mA. As amostras de argilas, na forma de pó, foram analisadas

em um intervalo de 5 a $70^\circ 2\theta$, com velocidade de varredura de $0,8^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$. As frações de silte e areia também foram analisadas na forma de pó não-orientado.

As frações de argila foram submetidas a tratamentos prévios, permitindo a análise em lâminas orientadas, com o objetivo de privilegiar o plano basal (00 l) dos filossilicatos. Para remover os óxidos de ferro, foi realizada adição de sódio, citrato de sódio e bicarbonato de sódio (DCB), conforme descrito por Jackson (1975).

Após a remoção dos óxidos, as amostras foram saturadas com cloreto de potássio (KCl, 1 mol.L⁻¹) e cloreto de magnésio (MgCl₂, 1 mol.L⁻¹). O processo consistiu na adição de 30 mL da solução de KCl/MgCl₂ em tubos de centrifugação, seguida de agitação horizontal por 24 horas. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 10 minutos, e o procedimento foi repetido com nova mecânica por 30 minutos. Para remover o excesso de cloretos, foram realizadas lavagens sucessivas com álcool 99,5°, homogeneizando a amostra por 10 minutos e centrifugando a 3.000 rpm por 10 minutos, repetindo o processo até obter teste negativo para a precipitação do nitrato de prata (AgNO₃).

As lâminas para DRX foram preparadas pelo método da pipeta, depositando-se 5 mg de argila por cm² de lâmina, garantindo a padronização das amostras. As lâminas saturadas com K foram submetidas a aquecimento a 550°C, enquanto as saturadas com Mg foram solvatadas com etilenoglicol. Esses tratamentos permitem a identificação dos filossilicatos, uma vez que cada mineral responde de maneiras distintas às variações no espaçamento interplanar (d), conforme o material saturante. As análises foram realizadas no intervalo de 3 a $40^\circ 2\theta$, com passo de $0,02^\circ 2\theta$ e velocidade de varredura de 3 s/passo.

Os critérios utilizados para interpretação dos difratogramas e identificação mineralógica foram baseados nos espaçamentos interplanares (d) e no comportamento dos picos de difração diante dos tratamentos térmicos e químicos, conforme descrito por Jackson (1975), Brown e Brindley (1980) e Moore e Reynolds (1989).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição morfológica e classificação dos perfis

Os atributos morfológicos dos sistemas solum-saprolitos estudados variaram conforme as condições geoambientais, influenciados por fatores como material de origem, relevo, hidrografia e densidade da vegetação, entre outros. A interação desses fatores de formação contribuiu para o desenvolvimento das diferentes classes de solums rasos, moduladas pela intensidade de atuação dos processos pedogenéticos (KER et al., 2015; PEREIRA et al., 2019; OLIVEIRA; SOUZA, 2021).

O P1 localizado no município de Gravatá (PE), foi classificado como Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário (Figura 4), apresentando profundidade de 60 cm para o conjunto solum-saprolito, com o horizonte saprolítico iniciando entre 20 e 30 cm, seguindo a transição difusa irregular (Quadro 2). O perfil exhibe uma sequência de horizontes A, AC, Cr1 e Cr2, todos com textura franco-arenosa e proporções de areia variando de 69% no horizonte AC e 79% no Cr2. A estrutura composta por blocos subangulares em todos os horizontes. A consistência, quando seco, varia de macia no horizonte A e AC a dura no Cr1 e extremamente dura no Cr2. Quando úmido, varia de friável nos horizontes A e AC a muito firme e extremamente firme no saprolito.

Quadro 2 – Descrição morfológica do perfil 1 – Neossolo Litólico Eutrófico fragmentário.

Horizontes	Prof. (cm)	Descrição morfológica
A	0 – 15 /	Preto-brunado (5 Y 3/1, úmido); Franco arenoso, ligeiramente pedregosa; fraca, pequenos blocos subangulares; consistência macia, friável; transição difusa irregular.
AC	15 – 20	Cinza (5 Y 4/1, úmido); Franco arenoso, não pedregoso; fraca, médios blocos subangulares; consistência macia, friável; transição difusa irregular.
Cr1	20 – 38	Oliva-acinzentado (5 Y 5/2, úmido); Franco arenoso; estrutura maciça; fortemente coesa; consistência dura, muito firme; transição difusa irregular; transição difusa irregular.
Cr1*	20 – 38	Oliva-acinzentado (5 Y 5/2, úmido); textura fanerítica; estrutura gnáissica; pouco coesa;
Cr2	38 – 60	Oliva-acinzentado (5 Y 5/2, úmido); Franco arenoso; estrutura maciça; fortemente coesa; consistência extremamente dura, extremamente firme; transição difusa irregular.
Cr2*	38 – 60	Oliva-acinzentado (5 Y 5/2, úmido); textura fanerítica; estrutura gnáissica; moderadamente coesa.

* Descrição experimental para saprolitos.

Figura 4 – Perfil de Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário, município de Gravatá (PE).



Foto; Autor, 2024.

O perfil 2 (Figura 5) está localizado no município de Serra Talhada (PE) e foi classificado como Planossolo Háplico Sáfico típico. O perfil apresenta uma sequência de horizontes A, Bt, Cr1 e Cr2, distribuídos em uma profundidade de 90 cm (Quadro 3), com o início dos horizontes saprolíticos a partir de 45 cm. A textura variou significativamente entre os horizontes, passando de franco-arenosa no horizonte A para franco-argilo-arenosa no Bt plânico (com 30% de argila), proporcionando uma transição abrupta e ondulada. O horizonte Cr1 manteve a textura observada no Bt, enquanto o Cr2 apresentou textura de areia franca, com uma transição clara e ondulada entre os horizontes Bt, Cr1 e Cr2.

A estrutura variou entre maciça moderada no horizonte A, colunar no Bt e maciça nos horizontes saprolíticos. A consistência, quando seco, variou entre ligeiramente dura no horizonte A, muito dura a extremamente dura no Bt, e extremamente dura no saprolito; quando úmido, variou de friável no horizonte A, para firme a muito firme no Bt, e extremamente firme nos horizontes saprolíticos.

Quadro 3 – Descrição morfológica do perfil 2 – Planossolo Háplico Sáfico típico.

Horizontes	Prof. (cm)	Descrição morfológica
A	0 – 18	Bruno oliváceo-escuro (2,5 Y 3/3, úmido); transição abrupta ondulada; estrutura maciça moderada; ligeiramente dura; friável; transição abrupta e ondulada.
Bt	18 – 45	Amarelo (2,5 Y 7/4, úmido); Franco argiloso arenosa; Estrutura muito grande colunar; muito dura e extremamente dura; firme a muito firme; transição gradual e plana
Cr1	45 – 80	Cinza (2,5 Y 5/4, úmido); Franco argiloso arenosa; estrutura maciça; extremamente dura; extremamente firme; transição abrupta e plana.
Cr1*	45 – 80	Cinza (5 Y 5/4, úmido); textura fanerítica; estrutura granular grossa; moderadamente coesa; transição abrupta e plana.
Cr2	80 – 90 +	Cinza (5 Y 5/4, úmido); areia franca; maciça; extremamente dura; extremamente firme;
Cr2*	80 – 90 +	Cinza (5 Y 5/4, úmido); textura fanerítica; estrutura granular grossa; muito coesa.

* Descrição experimental para saprolitos.

Figura 5 – Perfil de Planossolo Háplico Sáfico típicos, município de Serra Talhada (PE).



Foto: Autor, 2024.

O perfil 3 (Figura 6) está localizado no município de Floresta (PE) e foi classificado como Luvissole Crômico Órtico típico, apresentando uma sequência de horizontes A, Bt, Cr1 e Cr2. O perfil apresenta uma profundidade de 70 cm, com os horizontes saprolíticos iniciando a partir de 38 cm (Quadro 4). O horizonte A exibiu uma textura franco-arenosa, contrastando com a textura franco-argilosa observada no Bt. Nos horizontes saprolíticos, a textura é franco-argilo-arenosa, com uma leve redução na quantidade de argila e incremento de areia em comparação ao Bt. A transição entre os horizontes é abrupta ondulada entre o A e Bt, e clara ondulada nos demais horizontes.

O horizonte A apresentou característica muito pedregosa, com uma cobertura superficial de pedregosidade (calhaus) de aproximadamente 30%, enquanto os demais horizontes foram classificados como não pedregosa. A estrutura variou de média em blocos subangulares no horizonte A e Bt para grande em blocos angular nos Cr1 e Cr2. A consistência, quando seco, foi de ligeiramente dura no horizonte A; dura no Bt; muito dura no Cr1; e extremamente dura no Cr2. Quando úmido, foi friável no horizonte A; firme a muito firme no Bt; e de muito firme a extremamente firme nos horizontes saprolíticos.

Quadro 4 – Descrição morfológica do perfil 3 – Luvissole Crômico Órtico típico.

Horizontes	Prof. (cm)	Descrição morfológica
A	0 – 10	Bruno-escuro (7,5 YR 4/4 úmido); Franco arenosa; muito pedregoso; estrutura média blocos subangulares; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição abrupta e ondulada.
Bt	10 – 38	Vermelho (2,5YR 4/6, úmido); Franco argilosa; estrutura média blocos subangulares; cerosidade comum e moderada; firme, plástica e pegajosa; transição abrupta e ondulada.
Cr1	38 – 60	Vermelho-claro (2,5 YR 6/6, úmido); Franco argiloso arenosa; plástica e pegajosa; transição clara e ondulada; transição clara e ondulada.
Cr1*	38 – 60	Vermelho-claro (2,5 YR 6/6, úmido); textura fanerítica; estrutura xistosa; moderadamente coesa; transição clara e ondulada.
Cr2	60 – 70 +	Vermelho-claro (2,5 YR 6/6, úmido); úmido; Franco argiloso arenosa; plástica e pegajosa; transição clara e ondulada; transição clara e ondulada
Cr2*	60 – 70 +	Vermelho-claro (2,5 YR 6/6, úmido); textura fanerítica; estrutura xistosa; muito coesa.

* Descrição experimental para saprolitos.

Figura 6 – Perfil de Luvissole Crômico Órtico típico, município de Floresta (PE).



Foto: Autor, 2024.

A análise morfológica e a classificação dos perfis permitiram identificar que as três classes de solos do semiárido pernambucano refletem diretamente as características geoambientais da paisagem. No P1, o relevo declivoso é, possivelmente, o principal responsável pela baixa profundidade do solo, devido à erosão, que favorecem a remoção de material superficial.

Em contrapartida, no P2, pouca profundidade é favorecida pelo material de origem ácido, mais resistente ao intemperismo, aliado ao baixo índice pluviométrico. As cores acinzentadas observadas nesse perfil resultam da baixa declividade e da drenagem imperfeita, características atribuídas à baixa permeabilidade do solo (ARAÚJO FILHO et al., 2017).

No P3, o relevo suave ondulado favorece uma drenagem interna mais eficiente, enquanto o material de origem micaxisto contribui para a formação de argilominerais *in situ* e óxidos de ferro, devido à maior suscetibilidade dos minerais primários ao intemperismo. Esse

processo explica os elevados teores de argila nos horizontes saprolíticos, bem como as cores avermelhados nos horizontes.

As diferenças entre os materiais de origem dos perfis são evidentes (Figura 7). No P1 e P3, desenvolvidos a partir de gnaiss e micaxisto, respectivamente, observa-se maior porosidade nos saprolitos, atribuída à presença de fraturas de ruptura comuns em rochas metamórficas. Essas fraturas aumentam a porosidade, facilitam o intemperismo e promovem a penetração de raízes. Em contraste, o granito do P2 apresenta estrutura mais compacta e granular, com menor quantidade de fraturas, resultando em menor porosidade nos horizontes saprolíticos.

Figura 7 – Principais litologias presentes nos perfis de solos rasos analisados no semiárido pernambucano: A - gnaiss do Complexo Orobó 1; B – granito da Suíte Intrusiva Itaporanga; C – micaxisto do Complexo São Caetano.

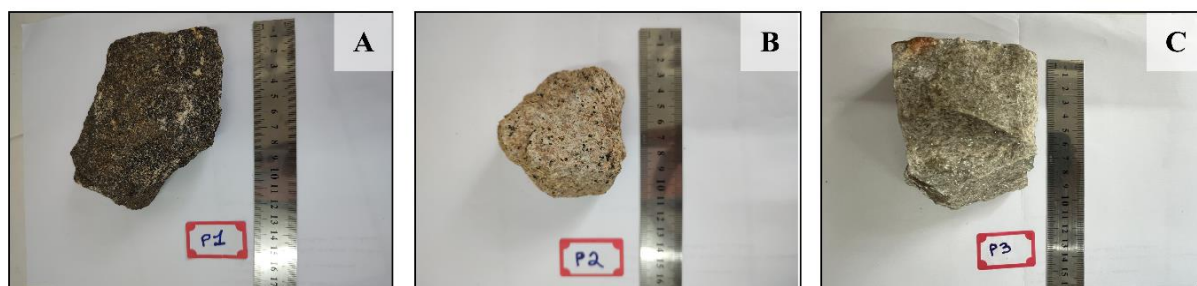


Foto: Autor, 2024.

4.2 Presenças de raízes no conjunto solum-saprolito

Os perfis analisados apresentaram variações significativas na densidade e morfologia das raízes conforme a profundidade (Tabela 1). Fatores como a densidade do solo, a granulometria, o material de origem e o tipo de cobertura vegetal desempenharam papel crucial na distribuição e no desenvolvimento das raízes nos diferentes horizontes dos perfis.

Os horizontes A de todos os perfis mostraram maior densidade de raízes, impulsionada pela grande presença de vegetação herbácea. Os horizontes saprolíticos de P1 apresentaram densidade moderada de raízes em comparação aos horizontes A e AC, com valores de 0,96 g kg⁻¹ no Cr1 e 0,62 g kg⁻¹ no Cr2. A característica xistosa do gnaiss favoreceu a formação de planos de fraturas no saprolito, o que facilitou a penetração radicular mesmo em camadas mais profundas (Figura 8).

Em campo, foram identificadas diferentes morfologias de raízes, incluindo pivotantes, secundárias pivotantes e fasciculadas. No geral, os horizontes saprolíticos de P1 não

apresentaram barreiras ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, embora a presença de raízes tenha sido pouca, e preferencialmente direcionadas pelas fraturas.

Tabela 1 – Densidade de raízes no conjunto solum-saprolito dos perfis estudados.

Horizontes	Prof.	Em campo	Densidade (g kg ⁻¹)
Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário			
A	0 – 15	comuns	2,64
AC	15 – 20	comuns	1,41
Cr1	20 – 38	poucas	0,96
Cr2	38 – 60	poucas	0,62
Planossolo Háplico Sáfico típico			
A	0 – 18	muitas	12,96
Bt	18 – 45	poucas	1,91
Cr1	45 – 80	poucas	0,56
Cr2	80 – 90 +	ausentes	0,00
Luvisolo Crômico Órtico típico			
A	0 – 10	muitas	10,46
Bt	10 – 38	muitas	5,11
cr1	38 – 60	comuns	3,61
Cr2	60 – 70 +	comuns	2,90

Na imagem A (Figura 8), nota-se a presença de raízes pivotantes penetrando o horizonte Cr1, enquanto raízes secundárias finas e médias avançam em direção ao Cr2, seguindo as zonas de fratura. Esses resultados corroboram estudos que destacam o papel do saprolito em regiões semiáridas como um reservatório funcional, oferecendo suporte hídrico e nutricional em profundidade.

Figura 8 – Presença de raízes nos horizontes saprolíticos do Neossolo Litólico eutrófico fragmentário: A – raízes pivotantes grossas e pivotantes secundárias finas no Cr1; B, C e D – presença de raízes pivotantes secundárias médias e finas nas fraturas dos saprolitos.

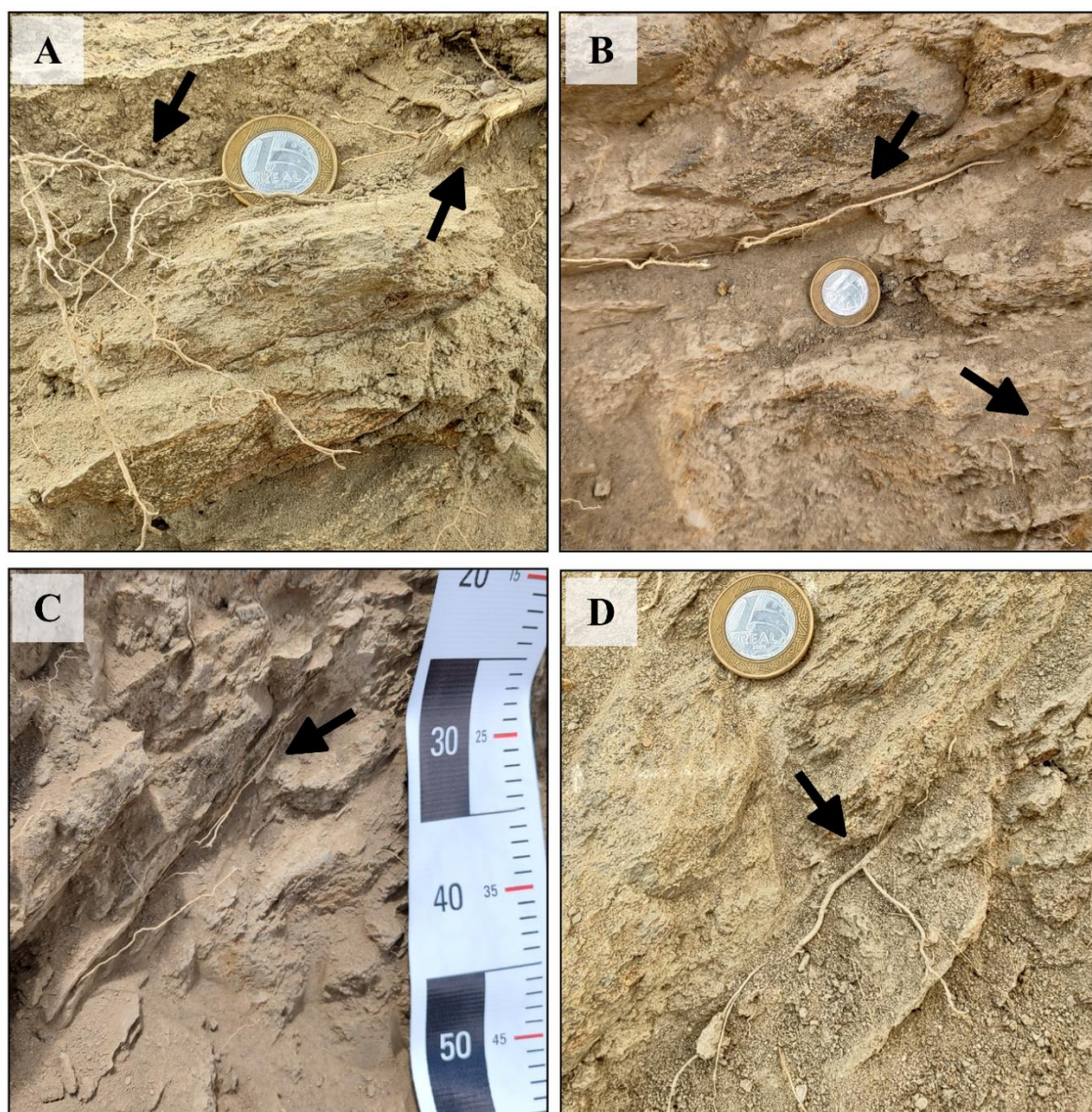


Foto: Autor, 2024.

No P2, a densidade de raízes no horizonte A foi a mais alta entre todos os perfis, com $12,96 \text{ g kg}^{-1}$, devido à cobertura de pastagem plantada, que favoreceu uma alta densidade de raízes fasciculadas na camada superficial, intercaladas com raízes mais grossas pivotantes de espécies arbustivas nativas. Entretanto, houve uma queda acentuada no horizonte Bt, que apresentou poucas raízes com densidade de $1,91 \text{ g kg}^{-1}$, atribuída à compactação e estruturação desse horizonte, que restringiram o desenvolvimento radicular.

No horizonte Bt (P2), observou-se que as raízes se concentraram predominantemente nas fendas dos blocos colunares, preenchidas por um material mais arenoso e menos denso, o

que facilita o avanço das raízes em direção ao Cr1 em busca de nutrientes, como demonstrado na Figura 9. Outro aspecto notável foi o desenvolvimento horizontal das raízes na transição entre os horizontes A e Bt, conforme ilustrado na imagem 2 da Figura 9. Essa adaptação é atribuída à dificuldade das raízes em penetrar e o horizonte Bt, devido à sua estrutura compacta.

Figura 9 – Distribuição das raízes no perfil de Planossolo Háplico Sáfico Típico: 1 – Perfil do solo; 1a – espaçamento entre os blocos colunares sendo utilizado pelas raízes como caminho preferencial em direção ao saprolito; 1b – presença de raízes pivotantes secundárias finas no horizonte Cr1; 2 – raízes se desenvolvendo na zona de transição entre os horizontes A e Bt.

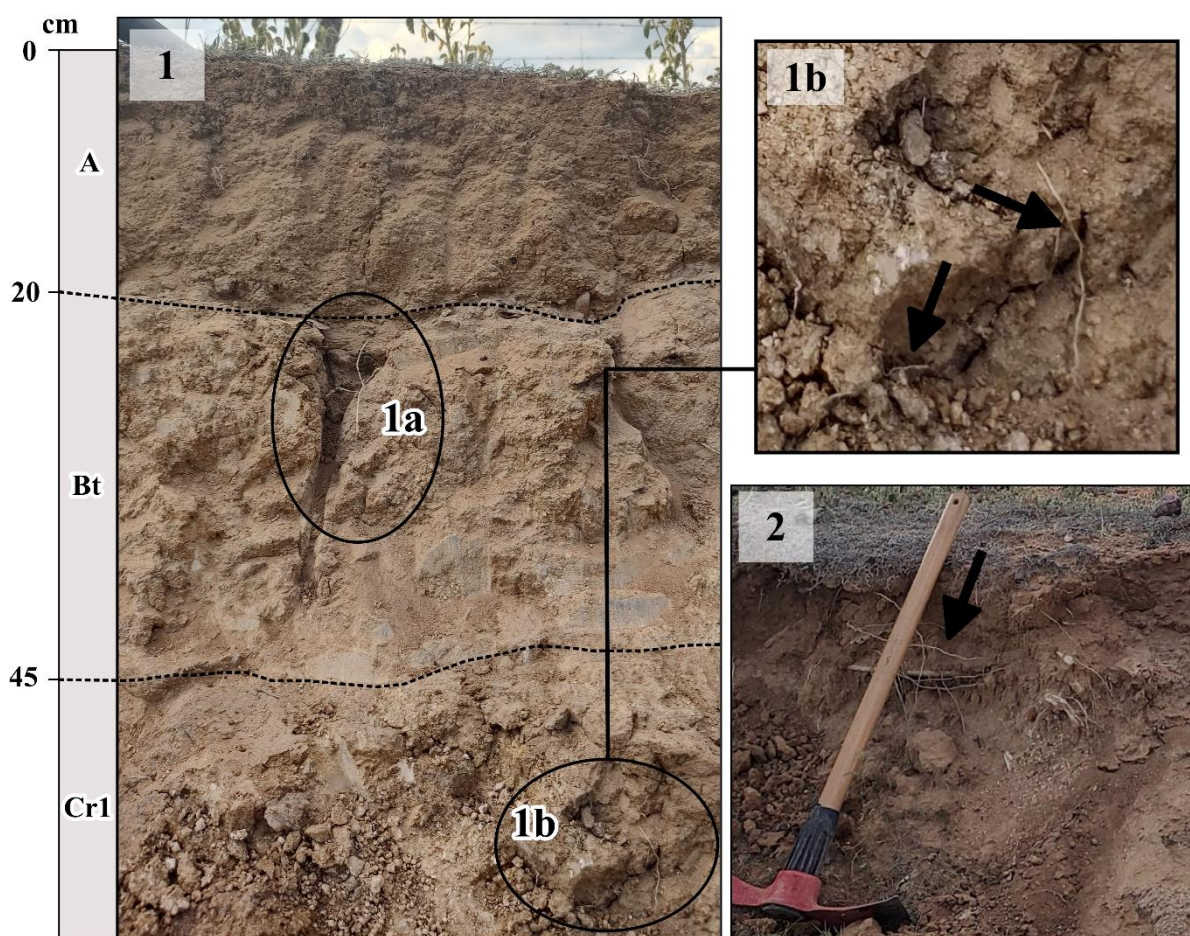
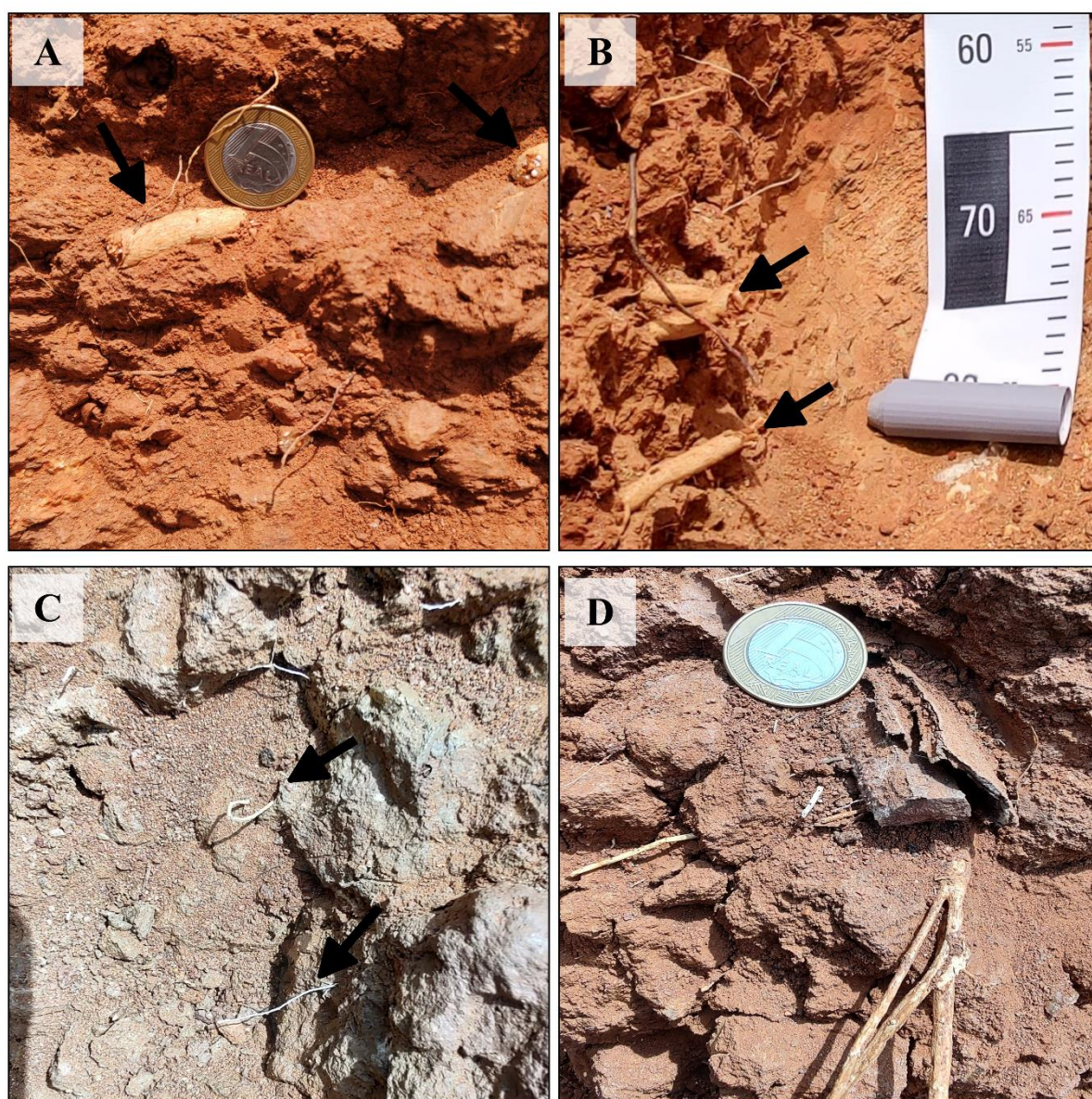


Foto: Autor, 2024.

A limitação imposta pelo horizonte Bt plânico do P2 impactou diretamente a densidade de raízes nos horizontes saprolíticos, uma vez que o acesso ao saprolito depende da capacidade da vegetação em superar essa barreira estrutural. Observou-se que as fendas entre os blocos colunares funcionam como principais vias de penetração radicular até o saprolito. Além disso, o próprio saprolito do P2, derivado de granito, que apresenta estrutura compacta e granular, sem xistosidade ou planos de fraturamento, também se mostrou um fator limitante ao aprofundamento das raízes.

O P3 apresentou uma alta densidade de raízes no horizonte A, registrando $10,46 \text{ g kg}^{-1}$, e uma distribuição mais uniforme nos horizontes subsuperficiais, especialmente no Bt, com uma densidade de $5,11 \text{ g kg}^{-1}$. Os horizontes saprolíticos também demonstraram uma boa densidade radicular, favorecida pela presença de fraturas associadas à xistosidade do micaxisto e ao maior grau de intemperismo, que proporcionaram caminhos ideais para o crescimento das raízes em profundidade (Figura 10).

Figura 10 – Distribuição das raízes no perfil de Luvissole Crômico Órtico típico: A – presença de raízes pivotantes grossas no horizonte Cr1, seguindo as zonas de fraturas; B e C – presença de raízes pivotantes grossas no e finas Cr2 entre 70 e 80 cm de profundidade; D – canal de raiz grossa morta sendo reutilizado por outras raízes no horizonte Bt em direção ao saprolito.



Em campo, foram observadas raízes médias e grossas no saprolito do P3, atingindo profundidades entre 70 e 80 cm, o que evidencia a capacidade das plantas de explorar camadas mais profundas em busca de recursos. Além disso, foi identificado a presença de canais de raízes mortas sendo utilizados por novas raízes no horizonte Bt e no Cr1, imagem D (Figura 10).

A vegetação nativa de Caatinga presente no P3 foi determinante para a maior presença de raízes em todos os horizontes, incluindo raízes pivotantes, que penetram em maior profundidade, e fasciculadas, que ampliam a exploração dos horizontes mais superficial do solo. Essa diversidade morfológica de raízes reflete a adaptação das espécies nativas às condições do semiárido, garantindo maior eficiência na absorção de água e nutrientes.

Nos perfis P1 e P3, os horizontes saprolíticos, derivados de rochas xistosas, contribuíram para uma maior densidade de raízes em comparação ao P2. Esse comportamento é explicado pelas fraturas e pelo intemperismo que facilitaram a penetração radicular. Por outro lado, no P2, associado a uma matriz granítica menos porosa, verificou-se menor densidade de raízes nos saprolitos e uma barreira física mais acentuada no horizonte Bt plânico, que dificultou o desenvolvimento radicular.

A adaptabilidade das raízes no P2 foi evidenciada pelo aproveitamento de fendas estruturais no horizonte Bt para acessar camadas mais profundas no saprolito. Esses resultados reforçam o papel dos saprolitos como extensão funcional do perfil edáfico, particularmente em regiões semiáridas, onde atuam como reservatórios de recursos hídricos, nutricionais e estruturais essenciais.

Plantas adaptadas à seca desenvolvem sistemas radiculares mais profundos, capazes de alcançar camadas ainda úmidas do solo, mesmo em condições adversas (JIN et al, 2017). Essas adaptações permitem otimizar a arquitetura das raízes para maximizar a captação de recursos em solos com limitações de estrutura e fertilidade.

A presença de raízes em horizontes saprolíticos reforça a importância desses materiais como reservatórios funcionais, contribuindo para a resiliência dos ecossistemas e oferecendo suporte hídrico e nutricional em sistemas de solos de pouca espessura. Além disso, durante o seu crescimento e a acomodação, as raízes podem modificar a estrutura do saprolito, ampliando as fraturas e espaços porosos.

Jin et al. (2017) apontam que, embora a estrutura do solo afete a distribuição das raízes, as plantas têm a capacidade de modificar essa estrutura para acomodar seu crescimento. Durante

o desenvolvimento, as raízes podem atravessar poros existentes ou a matriz do solo, criando fraturas que facilitam o fluxo de água e nutrientes. Esse processo é particularmente importante em horizontes não perturbados, como os saprolíticos, onde as raízes não só aproveitam a estrutura natural do material de origem, mas também ajudam a expandir os canais de poros e fraturas, aumentando sua conectividade e favorecendo tanto o armazenamento quanto o movimento de água e a disponibilidade nutrientes.

Além de seu papel biológico, as raízes promovem a estabilidade do solo e processos biogeoquímicos, sendo reconhecidas como um indicador de qualidade do solo (GARLET; SCHUMACHER, 2020; JACKSON, 1999; RIBEIRO et al., 2024). Do ponto de vista agrícola e ambiental, a existência de revestimentos de argila associados às raízes nas fraturas do saprolito incrementa o potencial de fertilidade das regiões mais profundas do regolito, especialmente quando subjacente a solos rasos (KRETZSCHMAR et al., 1995; SANTOS, 2015). Além disso, horizontes de saprolitos mais alterados podem favorecer o uso agrícola (PEDRON, 2007) e atividades de restauração florestal.

Por fim, embora o método utilizado para estimar a densidade radicular possa subestimar os valores reais, os dados indicaram um bom desempenho dos horizontes saprolíticos de P1 e P3, devido às características xistosas herdadas do material de origem. Em contrapartida, o P2 apresentou limitações, relacionadas à menor fraturação do material granítico e à compactação do horizonte Bt plânico, que restringiram o acesso das raízes aos saprolitos.

4.4 Caracterização dos atributos físicos

Nos solos rasos examinados, os horizontes saprolíticos revelaram propriedades importantes que, em análises focadas exclusivamente nos horizontes do solum (A e Bt para Planossolos e Luvisolos, e A e AC para Neossolos), frequentemente passam despercebidas, e geralmente não são atribuídas a essas classes, mas que podem aumentar a potencialidade agrícola e trazer contribuições ambientais valiosas para esses solos. Os valores referentes aos atributos físicos estão apresentados na Tabela 2.

O Neossolo Litólico, P1 destaca-se pela predominância da fração areia em todos os horizontes analisados, com teores de areia total variando entre 690,67 e 791,20 g kg⁻¹. Os teores de areia grossa foram superiores aos de areia fina, variando entre 509,40 e 599,29 g kg⁻¹ para a areia grossa e entre 181,27 e 204,20 g kg⁻¹ para a areia fina. Observa-se uma menor quantidade de areia total no horizonte AC, enquanto os maiores valores ocorrem nos horizontes saprolíticos Cr1 e Cr2, evidenciando um menor grau de intemperismo das partículas com o aumento da

profundidade. A fina areia mantém-se praticamente constante entre os horizontes, não apresentando diferenças significativas.

Nos horizontes mais superficiais (A e AC), os teores de silte são maiores, com valores de 188,51 e 213,19 g kg⁻¹, respectivamente, evidenciando um estágio mais avançado de intemperismo. Em contraste, nos horizontes Cr1 e Cr2, observa-se uma redução nos teores de silte, especialmente no Cr2 (107,83 g kg⁻¹), reforçando o menor intemperismo observado em profundidade.

A fração argila no P1 é relativamente baixa ao longo dos horizontes, com um leve aumento em profundidade, passando de 82,16 g kg⁻¹ no horizonte A para 100,97 g kg⁻¹ no Cr2. Esse aumento, embora discreto, pode estar relacionado ao processo de formação *in situ* da argila, que ao longo do tempo vai acumulando-se nas fissuras dos saprolitos (SANTOS, 2015). O aumento da argila nos Cr1 e Cr2, mesmo que pequeno, representa uma maior capacidade na retenção de nutrientes e umidade nesses horizontes, contribuindo assim para uma maior potencialidade do solo.

No Planossolo, observou-se uma alta concentração de areia total no horizonte A, com cerca de 706 g kg⁻¹, com uma maior proporção de areia fina em comparação à grossa, um padrão não observado nos demais horizontes e perfis. Além disso, houve um aumento significativo de silte nesse horizonte, indicando uma maior presença de frações finas, variando entre areia fina e silte, o que torna esses horizontes mais suscetíveis a processos erosivos (BATISTA et al., 2023; KOITER et al., 2017).

O horizonte Bt plânico em P2 apresentou uma redução nos teores de areia total (518 g kg⁻¹) e um aumento significativo de argila, atingindo aproximadamente 302 g kg⁻¹, uma característica típica dos Planossolos (SANTOS et al., 2018). Esse acúmulo de argila é acentuado pelo processo de argiluviação, onde partículas finas de argila são transportadas pela água das camadas superficiais para as camadas mais profundas do solo (KER et al., 2015). Como resultado, o horizonte Bt acaba acumulando mais argila e preenchendo os poros, enquanto a camada superficial se apresenta mais arenosa. Como resultado, o Bt se torna menos permeável, o que pode interferir na drenagem e favorecer a retenção de água nesses horizontes.

Entre os horizontes saprolíticos em P2, o Cr1 apresentou uma composição granulométrica mais semelhante ao horizonte Bt, com 586 g kg⁻¹ de areia total e 245,53 g kg⁻¹ de argila. Já no Cr2, houve um aumento expressivo na quantidade de areia total, atingindo cerca de 807 g kg⁻¹, dos quais 77% correspondem à fração de areia grossa, enquanto os valores de

argila total foram os mais baixos do perfil. A diferença nos teores de argila e areia entre Cr1 e Cr2 pode ser atribuída ao maior intemperismo ocorrido no Cr1, onde as partículas são mais decompostas, favorecendo a formação de argila *in situ*, enquanto o Cr2 manteve características mais arenosas, com baixas proporções de frações finas por estar menos intemperizado.

No Luvissole, os teores de areia total foram os mais baixos entre os três perfis, variando de 407 g kg⁻¹ no horizonte Bt a 626 g kg⁻¹ no Cr2, predominando a areia grossa em todos os horizontes. Tal como nos demais perfis, o Cr2 apresenta aumento na quantidade de areia, conforme a profundidade. Em relação ao silte observa-se um maior aporte dessas frações nos horizontes mais superficiais, diminuindo em profundidade.

Os valores de argila no Luvissole foram mais elevados do que os observados em P1 e P2, variando entre 180 g kg⁻¹ no horizonte A até 328 g kg⁻¹ no Bt. Esse maior aporte no horizonte Bt pode estar ligado ao processo de acumulação por argiluviação e formação *in situ* de argila de alta atividade (KER et al., 2015).

Nos horizontes saprolíticos do P3, os teores de argila também foram elevados, com valores de 275 g kg⁻¹ no Cr1 e 217 g kg⁻¹ no Cr2. Esses resultados indicam que o P3 passou por um processo de intemperismo mais avançado em comparação aos perfis P1 e P2, devido à maior suscetibilidade dos minerais primários do micaxisto. Esse grau de alteração favorece a formação de argilominerais nos horizontes saprolíticos. Essas características granulométricas conferem ao P3 um maior potencial agrícola e ambiental devido à sua capacidade de retenção de nutrientes e umidade.

A relação entre silte e argila (S:A) mostrou variações significativas entre os três perfis de solo analisados, refletindo o grau de intemperismo e a dinâmica de formação das diferentes classes de solo. No perfil P1, os valores de S:A foram mais elevados em todos os horizontes quando comparados com os demais solos, indicando um menor grau de intemperismo, um traço característico de solos jovens, como o Neossolo Litólico (LEITE, 2022).

Nos horizontes Bt dos perfis P2 e P3, a relação S:A foi mais baixa, indicando uma maior presença de argila em relação ao silte e um grau de intemperismo mais avançado. Esse processo ocorre porque, com o avanço do intemperismo, o silte tende a se transformar em argila, aumentando a proporção dessa fração fina. Além disso, parte dessa argila é translocada dos horizontes superficiais contribuindo para iluviação dos horizontes Bt.

Nos horizontes saprolíticos, observou-se uma leve redução na relação S:A em P1, acompanhado o aumento da proporção de argila com a profundidade, embora ainda em níveis

relativamente baixos. Em P2, essa relação foi baixa no horizonte Cr1 e mais elevada no Cr2, refletindo diretamente a maior concentração de argila em Cr1 em comparação a Cr2. No perfil P3, ambos os horizontes saprolíticos exibiram valores de S:A inferiores aos do horizonte Bt.

Apesar dessas tendências, em alguns casos, a relação S:A não seguiu exatamente a expectativa de representar o grau de intemperismo, sendo maior em horizontes mais intemperizados do que nos menos intemperizados. Isso sugere que outros fatores, como variações na deposição de partículas e processos de erosão, podem influenciar a relação SIL/ARG, além do simples avanço do intemperismo.

Nos perfis de solo analisados, os valores de argila dispersa em água (ADA) variaram conforme os horizontes e classes de solo. No P1, a ADA apresentou valores menores variando entre 56,43 g/kg no horizonte A e 69,83 g/kg no Cr2, sem diferenças significativas entre os horizontes.

Em P2 e P3, os horizontes Bt exibiram altos valores de ADA com 229 g/kg em P2 e 258 g/kg em P3, mantendo-se elevados nos Cr1 e ligeiramente menores no Cr2 de P3. Os valores mais baixos de ADA em cada perfil foram observados nos horizontes A que possuem textura mais arenosas, com exceção de P2, onde o valor mais baixo ocorreu no Cr2 indicando menor intemperismo e baixa formação de argila (Tabela 2). Os valores mais elevados de ADA no P2 e P3 sugerem uma maior presença de minerais 2:1, enquanto o valor mais baixo em P1 pode estar associado à presença de caulinita 1;1, devido à maior umidade.

Observou-se que, em todos os horizontes analisados, quanto maior o teor de argila total, maior foi o valor de ADA. A argila dispersa em água (ADA) é um indicador fundamental da estabilidade estrutural do solo e da sua resiliência contra a erosão (MOMOLI; COOPER, 2016; OLIVEIRA et al., 2012). Solos com alta dispersão de argila pode estar associados à presença de argilominerais do tipo 2:1 (FEITOSA et al., 2010), tornando-se mais suscetíveis à degradação por erosão, especialmente quando há saturação por sódio. No entanto, os solos analisados não apresentaram altas saturações por sódio, sugerindo que os elevados teores de ADA estão relacionados à presença de argilas 2:1, identificadas nos horizontes saprolíticos dos diferentes perfis.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos perfis de solo rasos e respectivos saprolitos característicos do semiárido de Pernambuco.

Horiz.	Prof.	Casc.	¹ AT	² AG	³ AF	⁴ SIL	⁵ ARG	⁶ ADA	⁷ S:A	⁸ GF	⁹ PT	¹⁰ Ds	¹¹ Dp
	cm	%	g kg ⁻¹						%		g cm ⁻³		
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário													
A	0 – 15	8	729,33	525,13	204,20	188,51	82,16	56,43	2,30	31,08	37,54	1,73	2,78
AC	15 – 20	10	690,67	509,40	181,27	213,19	96,15	67,39	2,26	30,15	37,63	1,73	2,78
Cr1	20 – 38	63	765,01	564,80	200,20	139,40	95,60	62,23	1,47	34,67	15,66	2,33	2,80
Cr2	38 – 60	67	791,20	599,20	192,01	107,83	100,97	69,83	1,07	30,67	18,91	2,31	2,90
P2 – Planossolo Háplico Sáfico típico													
A	0 – 18	7	706,13	336,60	369,53	192,19	101,68	75,85	1,89	25,41	43,77	1,59	2,82
Bt	18 – 45	5	518,40	317,40	201,01	179,53	302,07	229,04	0,59	24,18	30,33	1,82	2,61
Cr1	45 – 80	69	586,73	392,40	194,33	167,73	245,53	166,97	0,67	32,01	26,01	2,07	2,70
Cr2	80 – 90 +	77	807,67	623,13	184,53	110,90	81,43	51,77	1,3	36,01	16,99	2,31	2,80
P3 – Luvisolo Crômico Órtico típico													
A	0 – 10	10	569,73	335,67	234,07	249,44	180,83	130,27	1,38	27,65	39,72	1,61	2,67
Bt	10 – 38	6	407,87	233,60	174,27	263,23	328,91	258,40	0,80	21,43	41,14	1,64	2,78
Cr1	38 – 60	48	516,80	316,27	200,01	208,17	275,57	228,90	0,77	17,01	34,68	1,72	2,60
Cr2	60 – 70 +	59	626,67	382,93	243,73	156,23	217,10	186,17	0,70	13,67	31,62	1,80	2,70

¹Areia total, ²areia grossa, ³areia fina, ⁴silte, ⁵argila total, ⁶argila dispersa em água, ⁷relação silte:argila total, ⁸grau de floculação, ⁹porosidade total, ¹⁰densidade do solo,

¹¹densidade de partículas, ¹²sem desagregação, ¹³desagregação total e ¹⁴desagregação parcial.

Observou-se que, em todos os horizontes analisados, quanto maior o teor de argila total, maior foi o valor de ADA. A argila dispersa em água (ADA) é um indicador fundamental da estabilidade estrutural do solo e da sua resiliência contra a erosão (OLIVEIRA et al., 2012; MOMOLI; COOPER, 2016). Solos com alta dispersão de argila podem estar associados à presença de argilominerais do tipo 2:1 (FEITOSA et al., 2010), tornando-se mais suscetíveis à degradação por erosão, especialmente quando há saturação por sódio. No entanto, os solos analisados não apresentaram altas saturações por sódio, sugerindo que os elevados teores de ADA estão relacionados à presença de argilas 2:1, identificadas nos horizontes saprolíticos dos diferentes perfis.

O grau de flocculação foi mais baixo em P3, variando entre 27% no horizonte A e 13% no Cr2, enquanto P1 e P2 houve um leve aumento com pouca variação entre os horizontes do saprolito com valores entre 30% e 36%. Esses valores indicam um baixo grau de flocculação do solo e saprolito, estando diretamente relacionado com a ADA, no sentido que, quanto maior a dispersão natural da argila, menor é seu grau de flocculação. Essa variável apresenta implicações diretas na estabilidade dos agregados do perfil do solo que é reduzida em solos com baixo grau de flocculação. Além disso, solos com GF maior do que o ADA possuem melhores condições física e maior resistência a degradação (BARRETO et al, 2019; MAIO et al., 2011).

Os valores de densidade do solo (Ds) medidos variaram de acordo com a profundidade e a estrutura dos diferentes horizontes. No P1, os horizontes A e AC apresentaram uma média de Ds de $1,73 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto os horizontes A do P2 apresentou o menor valor, com Ds de $1,59 \text{ g cm}^{-3}$. No P3 os horizontes A e Bt também apresentaram valores mais baixos com $1,61$ e $1,64 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Esses valores relativamente baixos nos horizontes superiores podem ser explicados pelo maior teor de matéria orgânica, que contribui para uma menor densidade, e pela textura mais arenosa dos horizontes A, que reduz a compactação (BRADY, 1989).

Por outro lado, nos horizontes saprolíticos Cr1 e Cr2 dos perfis P1 e P2, foram observados valores de Ds elevados, entre $2,07$ e $2,33 \text{ g cm}^{-3}$. Essa densidade mais alta no saprolito reflete o menor grau de intemperismo e uma maior conservação da estrutura da rocha original, revelando um adensamento característico dessa região do regolito, e não uma compactação. Em contraste, o saprolito do P3 apresentou valores menores de Ds, com $1,72 \text{ g cm}^{-3}$ no Cr1 e $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ no Cr2, ficando dentro do limite crítico para o desenvolvimento das raízes, que é geralmente entre $1,70$ e $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (REICHERT et al., 2003; REINERT et al., 2008).

As observações de campo confirmaram que os horizontes saprolíticos, especialmente no P3, têm fraturas que facilitam a penetração de raízes de diferentes espessuras. Esses espaços aumentam a circulação e o armazenamento de água, além do suporte para o desenvolvimento de sistemas radiculares (MACHADO, 1997), que também encontrou alta frequência de raízes em fraturas de saprolitos, com espaçamentos de até 10 cm. Esses canais, portanto, não apenas mantêm a estabilidade física do solo, mas também suportam a estrutura da vegetação, principalmente em solos rasos, reforçando a funcionalidade ecológica e agrícola dos horizontes saprolíticos nas áreas semiáridas.

Observou-se que os altos valores de D_s no saprolito não são uniformes, pois as fraturas criam diferentes caminhos para a circulação de água e ar, influenciando o intemperismo ao longo do horizonte. Esse processo resulta na formação de distintos sistemas de porosidade, onde algumas áreas se tornam mais intemperizadas e porosas, enquanto outras permanecem mais compactas (DRIESE; MCKAY, 2004; SANTOS et al., 2018). Como consequência, há variações nos valores de D_s entre os horizontes.

Além disso, as fraturas geralmente abrigam materiais mais friáveis e intemperizados, melhorando a qualidade estrutural do saprolito e aumentando o potencial para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Essa característica é particularmente relevante para otimizar o uso desses solos rasos na Caatinga, que são frequentemente ocupados por pequenos agricultores familiares.

A densidade de partículas (D_p) variou de 2,60 a 2,90 g/cm³. De forma geral, houve pouca variação de D_p entre os horizontes dentro de cada perfil. Em P1 e P2, os menores valores de D_p foram observados nos horizontes mais superficiais (A e AC/Bt), enquanto os horizontes saprolíticos (Cr1 e Cr2) mostraram valores mais elevados, um padrão semelhante ao que foi identificado na densidade do solo. Em P3, no entanto, essa relação não foi evidente, pois o horizonte Cr1 apresentou valores menores de D_p , enquanto o horizonte Bt apresentou valores mais altos. A densidade de partículas está diretamente relacionada a densidade dos minerais que compõem o solo, sendo considerada mais estável, pois depende principalmente da composição mineral (TEIXEIRA et al., 2017).

Os valores de densidade de partículas identificados estão dentro dos limites esperados para os principais minerais primários identificados nas frações areia e silte, como quartzo (2,5 a 2,80 Mg m⁻³), ortoclásio (2,5 a 2,60 Mg m⁻³) e muscovita (2,7 a 3,0 Mg m⁻³), conforme Kiehl (1979). Dessa forma, nota-se que a maior densidade do solo nos horizontes saprolíticos está relacionada à maior densidade de partículas, em resposta a presença maior desses minerais e ao

menor intemperismo. Vale destacar, ainda, que a densidade do solo (D_s) é influenciada não apenas pela densidade de partículas, mas também por outros fatores, como a porosidade total e o teor de matéria orgânica (KER et al., 2015).

A porosidade total dos perfis de solo analisados apresentou variações significativas, entre os horizontes do solo e saprolito. No perfil P1, os horizontes A e AC mostraram uma porosidade média de 37%, dentro do intervalo considerado ideal para solos de textura arenosa, que varia entre 35% e 50%, conforme recomendado por Kiehl (1979). Esses valores indicam uma estrutura arenosa com baixa compactação, que facilita a infiltração de água e a aeração, aspectos fundamentais para o desenvolvimento radicular. Nos horizontes saprolíticos Cr1 e Cr2, a porosidade caiu para 15,66% e 18,91%, respectivamente.

O perfil P2, por sua vez, apresentou a porosidade mais alta entre os perfis, com 43,77% no horizonte A, sugerindo uma camada superficial bem estruturada e favorável para drenagem. Esse valor elevado diminuiu para 30,33% no horizonte Bt, onde a maior quantidade de argila contribuiu para o aumento da densidade. Nos horizontes saprolíticos Cr1 e Cr2 de P2, a porosidade total foi de 26,01% e 16,99%, respectivamente.

Em P3, os valores de porosidade total foram elevados nos horizontes A e Bt, com 39,72% e 41,14%, indicando uma boa organização estrutural e condições favoráveis para a infiltração de água e o desenvolvimento radicular. Nos horizontes saprolíticos Cr1 e Cr2 de P3, a porosidade total se manteve relativamente alta, com valores de 34,68% e 31,62%, sugerindo que o Luvissole possui uma transição mais gradual entre o solo e o saprolito. Essa transição facilita a retenção de umidade e a exploração radicular em profundidade, uma vantagem especialmente relevante em solos rasos.

O sistema de porosidade no saprolito difere daquele observado no solo, pois está associado ao conjunto de fraturas em sua estrutura. A quantidade e o tipo dessas fraturas variam conforme o litotipo e o grau de intemperismo (SANTOS et al., 2018; SCHOLTEN, 1997). Em solos rasos, o fraturamento nos saprolitos mais intemperizados desempenha um papel essencial, contribuindo para o armazenamento de umidade e para a nutrição das plantas (BUSS et al., 2010).

O saprolito em áreas desnudadas pode sustentar o crescimento da biomassa acima do solo, desempenhando um papel importante na zona de enriquecimento das plantas e controlando a capacidade de retenção de água para o cultivo (EVANS et al., 2024). Em saprolitos rasos, encontrados a menos de 1 metro de profundidade, as raízes das plantas podem acessar os

nutrientes presentes (BUSS et al., 2010). Além disso, revestimentos de argila, em fraturas estruturais, aumentam o potencial de fertilidade das camadas mais profundas do regolito, especialmente quando estão sob solos rasos (KRETZSCHMAR et al., 1995; SANTOS et al., 2018).

4.5 Caracterização dos atributos químicos

Os valores referentes aos atributos químicos então representados na Tabela 3. O potencial hidrogeniônico (pH) dos perfis variou de moderadamente Ácidos a básicos, dependendo do horizonte e da classe de solo. No P1 e P2, os valores foram mais baixos nos horizontes do solo (A, AC e Bt), variando de 6,0 a 6,5, indicando uma leve acidez na superfície e tendendo à neutralidade nos horizontes saprolíticos, com variação de 6,7 a 7,9 no horizonte Cr2. No P3, observou-se uma variação de 7,3 a 7,6.

Por outro lado, o pH em KCl, de todos os perfis foi mais baixo, entre 4,0 e 5,3. Os valores de delta pH foram negativos em todos os perfis, variando entre -1,3 e -3,2, o que revela uma predominância de cargas negativas nos perfis, especialmente nos horizontes saprolíticos. Essa característica está associada à maior presença de minerais 2:1 (MEKARU; UEHARA, 1972; SILVA, 2023). Esses dados mostram que, apesar da variação e da maior acidez nos horizontes superficiais, os horizontes saprolíticos desses solos aumentam o potencial do perfil como um todo, resultando em uma boa capacidade de retenção de nutrientes.

Os cátions trocáveis apresentaram diferenças significativas entre os perfis e horizontes associados. Nos três perfis os cátions predominantes são o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , que variaram de 21,6 a 263,4 mmolc kg^{-1} e de 26,3 a 263,8 mmolc kg^{-1} , respectivamente. Os menores valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram encontrados no P1 com um leve incremento em profundidade, enquanto os mais elevados foram registrados no P1 e P2, com um incremento significativo nos horizontes saprolíticos.

Os elevados valores de Mg^{2+} no solo estão associados à sua composição mineralógica, com destaque para os minerais ferromagnesianos como os anfibólios e ao menor intemperismo, que proporcionam uma liberação constante de nutrientes à medida que o intemperismo avança, além da presença de argilominerais 2:1 como a esmectita e vermiculita que podem conter o magnésio em sua estrutura cristalina (RICE; KAMPRATH, 1968; SILVA, 2023).

Os três perfis apresentaram concentrações de K^{+} e de Na^{+} de moderados a baixos, com algumas variações específicas conforme a profundidade. No P1, os valores de K^{+} e Na^{+} foram menores nos horizontes superficiais e aumentaram no saprolito. Por outro lado, o P2,

correspondente ao Planossolo Háplico, apresentou um teor de K^+ mais baixo em profundidade, com uma média de $1,8 \text{ mmolc kg}^{-1}$ no Cr2, contrastando com uma maior concentração de Na^+ nos horizontes mais profundos, chegando a $29,8 \text{ mmolc kg}^{-1}$ no horizonte Cr1.

O P3 apresentou baixos valores de potássio destacando-se os teores mais elevados no horizonte A ($15,8 \text{ mmolc kg}^{-1}$), que diminuem nos horizontes mais profundos (atingindo $2,0 \text{ mmolc kg}^{-1}$ no Cr2). O Na^+ também exibiu níveis baixos (de $1,0$ a $9,9 \text{ mmolc kg}^{-1}$), o que mantém um PST baixo e reduz os riscos de problemas estruturais.

A soma de bases (SB) em todos os perfis apresentou valores elevados, sendo sempre mais baixo no horizonte A, onde há maiores teores de areia, e mais altos nos horizontes Bt e nos saprolíticos. Esses valores elevados de SB, especialmente em P2 e P3, indicam solos pouco intemperizados, ricos em minerais primários, como plagioclásios, ortoclásios, anfibólios e micas, que liberam nutrientes ao longo do intemperismo (MELO et al., 2009; OLIVEIRA, 2007; SANTOS et al., 2012). Além disso, a presença de argilominerais do tipo 2:1 contribui para uma maior retenção desses nutrientes, evitando que sejam lixiviados e mantendo-os disponíveis para as plantas.

A CTC potencial nos três solos foi considerada alta em todos os perfis. O P1 apresentou os menores valores ($68,0$ a $99,4 \text{ mmolc kg}^{-1}$) com um incremento no saprolito, enquanto o P2 apresenta um acréscimo intermediário entre os perfis, especialmente no horizonte Cr1 com $315,7 \text{ mmolc kg}^{-1}$. O P3 exibe os maiores valores de CTC potencial entre os três perfis com destaque para os horizontes Bt e Cr1 com $550,2 \text{ mmolc kg}^{-1}$ e $505,5$ no Cr1, respectivamente, impulsionada pela alta presença de cálcio e magnésio.

Em relação a CTC efetiva, observou-se valores próximos a CTC potencial, com variações ligadas diretamente ao pH. Nos horizontes com pH abaixo de 7, a CTC efetiva ficou abaixo da CTC potencial, enquanto nos horizontes com pH acima de 7 a CTC efetiva apresentou um leve aumento em relação a CTC potencial.

A elevada CTC nesses solos indica um bom potencial agrícola, especialmente devido aos altos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e aos baixos teores de Na^+ e Al^{3+} , o que favorece a fertilidade e a retenção de nutrientes essenciais para as plantas. Nos horizontes saprolíticos, apesar da textura arenosa predominante, os valores de CTC foram superiores aos dos horizontes A e AC em P1, A e Bt em P2, e próximos aos do Bt em P3. Essa característica é particularmente benéfica para o cultivo em áreas de solos rasos, pois os horizontes saprolíticos desempenham um papel importante na disponibilidade de nutrientes, devido à presença de argilas de melhor qualidade.

Tabela 3 – Propriedades químicas dos perfis de solos rasos e respectivos saprolitos característicos do semiárido de Pernambuco.

Horiz.	¹ pH	² pH	³ ΔpH	⁴ P	⁵ Ca ²⁺	⁶ Mg ²⁺	⁷ K ⁺	⁸ Na ₊	⁹ SB	¹⁰ T	¹¹ Al ³⁺	¹² H+Al	¹³ t	¹⁴ PST	¹⁵ V	¹⁶ m	¹⁷ COT	¹⁸ MO	CE
	H ₂ O	KCl		mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹									%			g kg ⁻¹		dS.m ⁻¹
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário																			
A	6,0	4,3	-1,7	0,7	21,6	27,7	3,4	3,2	55,9	68,0	4,0	12,1	59,9	4,7	82,2	6,6	6,0	10,3	0,54
AC	6,1	4,4	-1,7	0,5	23,7	37,4	3,4	4,6	69,2	83,5	4,9	14,3	74,1	5,5	82,9	6,7	6,8	11,6	0,45
Cr1	6,6	4,1	-2,5	50,9	26,7	40,8	8,9	6,1	82,4	99,4	4,2 a	17,1	86,6	6,1	82,8	4,9	7,1	12,2	0,19
Cr2	6,7	4,2	-2,5	68,5	23,9	45,0	8,6	7,5	85,0	98,8	3,3 b	18,7	88,3	7,6	86,1	3,7	6,6	11,4	0,32
P2 – Planossolo Háplico Sáfico típico																			
A	6,5	4,9	-1,5	8,8	70,3	26,3	4,0	1,3	102,0	113,0	2,1	11,0	104,1	1,2	90,2	2,1	6,4	11,1	0,22
Bt	6,5	4,0	-2,5	0,1	109,9	117,8	1,8	16,3	245,9	261,8	2,8	16,0	248,7	6,2	93,9	1,1	3,4	5,9	0,56
Cr1	6,2	4,3	-1,9	49,4	125,5	152,7	2,2	29,8	310,2	315,7	1,8	6,6	311,9	9,4	98,3	0,6	0,8	1,4	4,89
Cr2	7,9	5,3	-2,7	387,1	86,4	83,5	1,5	12,4	183,8	182,7	0,7	0,6	184,5	6,8	100,0	0,4	0,2	0,3	0,65
P3 – Luvissolo Crômico Órtico típico																			
A	7,4	6,1	-1,3	8,3	195,5	115,0	15,8	1,0	327,3	341,0	0,9	13,8	328,2	0,3	96,0	0,3	27,5	47,3	0,63
Bt	7,3	4,9	-2,4	0,5	263,4	263,8	3,1	4,1	534,3	550,2	0,7	16,0	535,0	0,7	97,1	0,1	6,4	11,0	0,51
Cr1	7,5	4,5	-3,0	1,5	226,0	254,5	2,3	9,9	493,5	504,5	1,3	11,6	494,7	2,0	97,8	0,2	2,8	4,8	0,52
Cr2	7,6	4,6	-3,2	1,5	199,7	235,7	2,0	9,2	446,5	452,6	1,1	6,1	447,6	2,00	98,7	0,2	1,4	2,4	0,46

¹Potencial hidrogeniônico em água, ²potencial hidrogeniônico em KCl, ³diferença de potencial, ⁴fósforo disponível, ⁵cálcio trocável, ⁶magnésio trocável, ⁷potássio trocável, ⁸sódio trocável, ⁹soma de bases, ¹⁰capacidade de troca de cátions potencial, ¹¹alumínio trocável, ¹²acidez potencial, ¹³capacidade de troca de cátions efetiva, ¹⁴porcentagem de sódio trocável, ¹⁵saturação por bases, ¹⁶saturação por alumínio, ¹⁷carbono orgânico total, ¹⁸matéria orgânica

Os valores de saturação por bases mostram uma tendência elevada, especialmente nos horizontes saprolíticos de todos os perfis, o que confirma os altos valores da soma de bases e da CTC potencial, conferindo aos solos um caráter eutrófico. No P1, essa saturação por bases foi mais baixa, aumentando em profundidade, variando entre 82,2% e 86,1%. Esse percentual menor em comparação aos demais perfis é influenciada por um leve aumento na saturação por alumínio, provavelmente devido ao maior avanço do intemperismo.

No P2 e P3, a influência de argilominerais 2:1 na potencialidade química pode ser visto na Tabela 5, que demonstra valores de saturação por bases muito altos, variando entre 90,2% e 100% em P2 e entre 96,0% e 98,7% em P3, e saturação por alumínio muito baixa. Quando a saturação por bases é alta, a saturação por alumínio tende a ser baixa (KER et al., 2015). Isso ocorre devido aos baixos valores de alumínio ocupando o complexo de troca catiônica do solo, o que libera espaço para cátions de bases trocáveis, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} (RAIJ, 2011).

No P1, os teores de alumínio foram mais elevados, atingindo um máximo de 4,9 mmolc kg^{-1} sugerindo um material mais intemperizado. Já nos perfis P2 e P3, esses valores ficaram abaixo de 2,8 mmolc kg^{-1} nos horizontes superficiais e de 1,8 mmolc kg^{-1} nos saprolíticos. Assim, a baixa saturação pelo alumínio identificada indica uma mínima toxicidade por alumínio e levam ao aumento da V%, melhorando a fertilidade desses solos.

Sobre a porcentagem sódio trocável (PST), os valores mais baixos foram identificados no perfil P3, permanecendo abaixo de 2%. Em contraste, o perfil P1 apresentou os valores mais elevados, que aumentaram levemente em profundidade, alcançando o limite máximo de 7,6% no horizonte Cr2. O maior valor de PST foi observado no horizonte Cr1 do P2, atingindo 9,45%.

Ao analisar os valores de PST e da condutividade elétrica (CE), notou-se que o horizonte Cr1 do P2 apresenta um caráter salino (SANTOS et al., 2018), com uma CE superior a 4,89 dS/m. Os demais horizontes do P2 e os outros perfis apresentaram uma CE inferior a 0,64 dS/m. Embora os teores de Na^{+} mais elevados encontrados tenham implicações na taxonomia dos solos, eles não se configuram como um fator limitante ao cultivo agrícola nessas áreas, uma vez que ocorrem em profundidade (SANTOS et al., 2012).

A acidez potencial apresentou-se relativamente baixa, refletindo os baixos teores de alumínio trocável e a saturação reduzida por alumínio nos perfis. Esse comportamento foi apresentado especialmente nos horizontes saprolíticos do P2 e P3, onde a saturação por alumínio foi extremamente baixa, resultando em uma alta saturação por bases.

Os valores mais elevados da acidez potencial foram observados no Cr1 e Cr2 do P1 variando de 17,1 a 18,7 mmolc kg⁻¹ respectivamente, e nos horizontes Bt de P2 e P3 com 16 mmolc kg⁻¹ cada. Esses valores mais elevados da acidez potencial podem ser explicados em função da atividade de organismos, e consequentemente a quantidade de H⁺ (ARTUR et al., 2014), uma vez que os teores de Al³⁺ não foi significativo em todos os perfis.

Os valores mais elevados de acidez potencial foram observados nos horizontes Cr1 e Cr2 do P1, variando de 17,1 a 18,7 mmolc kg⁻¹, e nos horizontes Bt de P2 e P3, ambos com 16 mmolc kg⁻¹. Essa acidez pode estar relacionada à atividade biológica no solo, especialmente à ação de micro-organismos e raízes, que promovem a mineralização da matéria orgânica e a produção de ácidos orgânicos, liberando íons H⁺ no meio (ARTUR et al., 2014). Como os teores de Al³⁺ foram insignificantes em todos os perfis analisados, os processos biológicos e físicoquímicos parecem ser os principais responsáveis pela acidez observada.

O fósforo disponível apresentou diferenças significativas entre os perfis. No perfil P1, os valores de P foram muito baixos nos horizontes do solo com uma média de 0,6 mg kg⁻¹, aumentando substancialmente em profundidade para 50,9 mg kg⁻¹ no Cr1 e 68,5 mg kg⁻¹ no Cr2. Esse mesmo comportamento foi observado no P2, que mostrou um teor de P baixo no horizonte A e quase inexistente no Bt, com 0,1 mg kg⁻¹, enquanto nos horizontes saprolíticos, os valores de P foram muito altos chegando a 387,1 mg kg⁻¹ no Cr2. O P3 apresentou resultados distintos, com baixos valores de P em todos os horizontes, sendo o maior teor registrado no horizonte A (8,3 mg kg⁻¹).

Os resultados obtidos sugerem que os altos teores de P identificados nos horizontes saprolíticos estão mais associados a materiais inorgânicos, tendo em vista, os baixos valores de MO e COT nessa zona. Esses achados estão alinhados com os resultados obtidos por Silva (2023), que também observou altos níveis de P em solos da mesma classe em ambientes semiáridos. Isso indica que o fósforo, no saprolito, pode ser predominantemente inorgânico, originário de minerais primários presentes em estágios moderados de intemperização de saprolito oriundos de rochas cristalinas (LIMA, 2022).

Valores e comportamentos de P parecidos nos horizontes saprolíticos também foram registrados por Santos (2015), para Luvisolos e Planossolos do semiárido pernambucano. Essa reserva de fósforo no saprolito subjacente a solos raso pode representar uma fonte adicional importante para culturas, dependendo do tipo de manejo adotado, especialmente em regiões tropicais onde o P é considerado como o nutriente mais limitante para a produção de biomassa (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Acerca do carbono orgânico total (COT), foi identificado baixos teores deste atributo na maioria dos horizontes analisados. No P1, os valores foram baixos e relativamente uniformes ao longo dos horizontes do solo e do saprolito, com uma média de $6,6 \text{ g kg}^{-1}$. Os menores teores de COT foram observados no P2, variando entre 6,4 no horizonte A e 0,4 no Cr2. O P3 apresentou o mesmo decréscimo de COT em profundidade apresentado no P2; no entanto, registou um valor elevado no horizonte A, chegando a $27,5 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto no saprolito o conteúdo foi inferior a $2,8 \text{ g kg}^{-1}$, considerado muito baixo.

Os baixos teores de COT descritos são compatíveis com os valores esperados para solos do semiárido, onde a adição da matéria orgânica é limitada pelas condições climáticas (CURI et al., 2017). Os teores mais elevados nos horizontes superficiais e declínio do COT em profundidade é consistente com os valores coletados por Santos et al. (2021), que indica uma redução acentuada desse atributo nos horizontes subsuperficiais em solos rasos do semiárido pernambucano.

No caso do P3, os níveis mais altos de COT no horizonte A refletem o fato de ser uma área de vegetação nativa com Caatinga arbustiva esparsa, onde a presença de serrapilheira e outros resíduos orgânicos contribui para um maior aporte de carbono orgânico no horizonte superficial (JAKELAITIS et al., 2008; NANZER et al., 2019).

Maiores teores de COT em horizontes superficiais com vegetação nativa, em contraste com áreas de lavouras e pastagem, também foram identificados por Júnior et al. (2011) em áreas de cerrado, onde os teores de COT na superfície são superiores aos de áreas sob uso agrícola e pastagem. Os autores atribuem essa diferença ao menor aporte de material na fração leve livre de carbono na camada superficial nas áreas de lavoura e pastagem.

A presença de raízes no saprolito, especialmente em solos rasos, evidencia a importância ambiental desses horizontes na disponibilização de nutrientes para a vegetação nativa. Isso também indica uma boa potencialidade agrícola, especialmente para a implantação de sistemas agrícolas de pequeno e médio porte por agricultores familiares, como Sistemas Agroflorestais (SAFs). Esse modelo permite o consórcio de culturas de ciclos curtos e perenes com espécies nativas, promovendo uma ciclagem de nutrientes essenciais para a sustentabilidade do sistema.

Dessa forma, entende-se que a profundidade efetiva desses solos rasos deve incluir os horizontes saprolíticos, já que eles atuam como importantes fornecedores de nutrientes e água para diversas culturas (GUERRA, 2015; MACHADO, 1997; STONE; ECOMEFORD, 1994). Além disso, os saprolitos desempenham uma função ambiental relevante, retendo nutrientes

que sustentam a vegetação nativa, fortalecendo a resiliência dos serviços ecossistêmicos dos ambientes semiáridos.

4.6 Diferentes tratamentos na obtenção da TFSA no saprolito

O saprolito é conhecido por ser um material isovolumétrico que mantém a estrutura da rocha original (BECKER, 1895), variando em composição conforme o material de origem e o grau de intemperismo e características pedológicas ainda incipientes. Com o aumento do interesse pelo seu uso em estudos agrícolas, há uma discussão crescente sobre a melhor metodologia para análise de seus atributos físicos e químicos.

As análises de saprolito geralmente envolvem a coleta de amostras em campo e uma série de tratamentos de preparação para a caracterização de suas propriedades que geralmente segue as mesmas metodologias realizados nos horizontes do solo, conforme Santos et al. (2015) e Teixeira et al. (2017). No entanto, os saprolitos incluem características morfológicas distintas das encontradas no solum, resultando em diferentes abordagens para sua desagregação, o que pode ou não impactar nos resultados das análises físicas e químicas.

Com esta análise, objetiva-se avaliar se diferentes preparos das amostras de saprolitos na obtenção da TFSA influenciam nos resultados das análises laboratoriais dos atributos físicos e químicos do saprolito. Para isso, as amostras de saprolito foram submetidas a três tipos de tratamento para obtenção da TFSA:

1. Sem desagregação (SDE): quando apenas o material naturalmente desagregado durante a coleta é utilizado;
2. Desagregação total (DET): onde toda a amostra é desagregada para passar pela peneira de 2 mm;
3. Desagregação parcial (DEP): onde a amostra é destorroada manualmente com força moderada, permitindo a passagem de uma parte do material na peneira de 2 mm.

Esses procedimentos são importantes, pois o tipo de tratamento aplicado afeta a homogeneidade das amostras. Por exemplo, amostras totalmente desagregadas tendem a oferecer uma maior uniformidade na análise química, enquanto a desagregação parcial pode melhor representar o estado natural do saprolito no ambiente de campo. As tabelas com o Teste de Fisher a 5% de probabilidade e o coeficiente de variação estão disponíveis nos Apêndices A, B e C.

Nos atributos físicos (Tabela 4), os valores de cascalho apresentaram diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, o que já era esperado, tendo em vista que o SDE levou em consideração apenas o material desagregado durante a coleta, mantendo retido na peneira de 2 mm a maior parte da amostra, que variou conforme o grau de intemperismo dos horizontes saprolíticos. Nos Cr1 por exemplo, o percentual de cascalhos para o tratamento SDE foram relativamente menores do que nos Cr2 no P1 e P2; no P3 a diferença foi menos significativa devido ao maior grau de intemperismo.

Os tratamentos DEP apresentaram menores valores de cascalhos retidos na peneira, com um leve aumento no Cr2. No Cr1 o DEP mostrou variações entre 69% de cascalho no P2 e 48% no P3, enquanto no Cr2 o valor mais elevado foi observado no P2 (77%), isso pode estar ligado ao fato de o P2 ser proveniente de um granito que apresenta uma estrutura mais compacta e uma maior presença de quartzo.

Nos tratamentos DET foi destorroado 100% das amostras que em seguida passaram pela peneira de 2 mm. O fato do material de origem do P1 e P3 apresentar uma estrutura xistosa favoreceu a desagregação total da amostra do saprolito enquanto, o P2 apresentou uma maior resistência ligada diretamente ao maior predomínio de grãos de quartzo.

Os valores de cascalho nos tratamentos aplicados ao saprolito apresentaram variações notáveis, refletindo a influência das diferentes metodologias de preparo nas características físicas das amostras. Como esperado, o tratamento SDE resultou em valores elevados de cascalho retido na peneira de 2 mm, já que somente o material naturalmente solto foi incluído.

As análises de areia total e de areia grossa mostraram diferenças significativas entre o tratamento SDE e os tratamentos com desagregação (DET e DEP), para os horizontes Cr1 e Cr2 do P1 e P3. Em geral, DET e DEP resultaram em maiores valores para esses atributos, o que sugere que a desagregação facilita a formação de partículas de areia, especialmente as de maior diâmetro. A areia fina, apresentou variações significativas apenas no horizonte Cr2 do P2 e no Cr1 do P3, com diferenças intermediárias observadas no Cr2 do P1 e Cr2 do P3. Esses resultados indicam que, de modo geral, a fragmentação promovida pelos tratamentos de desagregação não alterou substancialmente a quantidade de areia fina na maioria dos horizontes analisados.

A quantidade de silte variou significativamente entre os tratamentos nos horizontes Cr1 e Cr2 do P1, com o SDE apresentando valores mais elevados em comparação com DET e DEP que não variaram. Esse resultado indica que, ao manter a estrutura original do saprolito, o

tratamento SDE preserva o teor de partículas menores como o silte e a areia fina, enquanto a desagregação total ou parcial tende a aumentar o teor de partículas maiores como a areia grossa.

A argila total apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos do horizonte Cr1 em P2 e P3, o que indica que a quantidade de argila variou com o tipo de preparação aplicado. Isso pode estar relacionado à presença de argilas nas fraturas dos agregados do saprolito que podem ser liberadas com os tratamentos DAT e DEP que apresentaram valores mais elevados no Cr1 do P3 em relação ao tratamento SDE.

Os demais horizontes dos três perfis não apresentaram diferenças significativas para a argila total o que pode indicar também uma menor suscetibilidade da argila à fragmentação durante a desagregação mecânica, mantendo-se relativamente estável em todos os tratamentos. Da mesma forma, a argila dispersa em água (ADA) não mostrou variação entre os tratamentos, o que sugere que o tratamento aplicado não afetou a dispersão natural das partículas de argila.

O grau de floculação não apresentou variação significativa em nenhum dos horizontes dos solos analisados, sugerindo que o estado de agregação das partículas do solo se manteve constante independentemente do tratamento. Já a relação silte mostrou algumas variações significativas, especialmente entre SDE e os tratamentos de desagregação, refletindo as variações observada no silte já que a argila não variou.

Os resultados dos diferentes tratamentos do saprolito aplicados aos atributos químicos (Tabela 5), indicaram que a escolha do método de preparo SDE, DET, e DEP impactam diretamente poucos atributos químicos de horizontes específicos, essas variações refletem como o tratamento afeta a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de troca de cátions (CTC), o que pode ser crucial para a interpretação da fertilidade e do comportamento químico do solo.

No P1, os tratamentos não revelaram variações significativas no pH em água, com exceção do horizonte Cr2, onde o tratamento DET apresentou valores mais elevados em relação a SDE e DEP. Nos demais solos, P2 e P3, o pH apresentou menor variação, sendo mais estável, o que indica uma menor influência dos tratamentos sobre a acidez e alcalinidade das amostras.

A disponibilidade de cátions como cálcio e magnésio foi particularmente pouco influenciada pelos diferentes tratamentos, com exceção do horizonte Cr1 do P3, onde DET apresentou maiores concentrações desses cátions em comparação com os outros tratamentos. Isso sugere que a desagregação completa desse horizonte em específico facilitou a liberação de cálcio e magnésio, que podem estar adsorvidos nas superfícies dos agregados do saprolito.

O potássio apresentou valores significativamente mais altos em DET e DEP na maioria dos horizontes analisados, indicando que a fragmentação promove uma liberação maior desse nutriente nos horizontes do P1 e no Cr1 de P2 e P3. O sódio, por outro lado, mostrou variações menos expressivas entre os tratamentos, especialmente no P1. No P2 e P3 houve um maior incremento no DET e DEP. Essa estabilidade pode ser atribuída à baixa quantidade de sódio naturalmente presente nesses saprolitos, o que limita as diferenças entre os tratamentos.

O fósforo, um dos nutrientes mais importantes para o crescimento vegetal (TRINDADE et al., 2011), apresentou diferenças significativas nos horizontes saprolíticos do P1, onde os tratamentos DET e DEP resultaram em teores mais elevados de fósforo disponível em comparação com SDE. Esse efeito pode estar associado à liberação de fósforo ligado a minerais e à maior exposição de superfícies revestidas por argilas com a desagregação. Nos demais perfis, as diferenças foram menos pronunciadas, sugerindo que a influência dos tratamentos sobre o fósforo depende também das características específicas de intemperismo e mineralogia do horizonte.

O alumínio trocável, um indicador de acidez tóxica em solos, mostrou variações significativas entre os tratamentos apenas no horizonte Cr2 do P1, onde os valores de SDE e DET apresentaram valores mais altos em comparação com DEP. Esse resultado indicou que a desagregação parcial nesse horizonte reduziu a toxicidade potencial do alumínio, possivelmente pela liberação de bases que neutralizam a acidez. A acidez potencial, medida com H+Al, manteve-se relativamente constante entre os todos os tratamentos de cada horizonte, sem variações significativa, reforçando a pouca influência dos tratamentos de desagregação sobre a acidez total.

A saturação por bases e a CTC, tanto efetiva (t) quanto potencial (T), apresentaram variações mais expressivas no Cr2 do P1 e no Cr1 do P3. Em DET, os valores de V e T foram superiores em comparação com SDE, indicando que o tratamento com desagregação promoveu uma maior disponibilidade de cátions básicos nesses horizontes, essenciais para aferição total da fertilidade do saprolito. O P2 não apresentou variações significativas entre os diferentes tratamentos.

A saturação por alumínio não mostrou variação entre os tratamentos, o que sugere que a proporção de alumínio trocável em relação aos demais cátions permanece estável, mesmo com as diferentes formas de preparo das amostras. O carbono orgânico total permaneceu estável entre os diferentes tratamentos, sem variações significativas.

Tabela 4 – Propriedades físicas dos diferentes tratamentos da TFSA das amostras do saprolitos em solos rasos no semiárido de Pernambuco.

Horiz.	Prof.	Trat.	Casc.	¹ AT	² AG	³ AF	⁴ SIL	⁵ ARG	⁶ ADA	⁷ S:A	⁸ GF	⁹ PT	¹⁰ Ds	¹¹ Dp
cm			%	g kg ⁻¹							%	g cm ⁻³		
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário														
Cr1	20 – 38	¹² SDE	77	711,07 b	482,20 b	228,87 a	184,10 a	104,83 a	68,03 a	1,73 a	35,01 a	16,75 a	2,33 a	2,80 a
		¹³ DET	0	751,60 a	542,80 a	208,80 a	147,57 b	100,83 a	66,50 a	1,47 a	33,67 a	15,76 a	2,33 a	2,80 a
		¹⁴ DEP	63	765,01 a	564,80 a	200,20 a	139,40 b	95,60 a	62,23 a	1,47 a	34,67 a	15,66 a	2,33 a	2,80 a
Cr2	38 – 60	SDE	79	687,01 b	473,20 b	213,80 a	203,73 a	109,27 a	74,37 a	1,87 a	32,01 a	17,94 a	2,31 a	2,80 b
		DET	0	778,20 a	571,27 a	206,93 ab	118,53 b	103,27 a	69,53 a	1,17 b	33,01 a	20,22 a	2,31 a	2,87 ab
		DEP	67	791,20 a	599,20 a	192,01 b	107,83 b	100,97 a	69,83 a	1,07 b	30,67 a	18,91 a	2,31 a	2,90 a
P2 – Planossolo Háplico Sáfico típico														
Cr1	45 – 80	SDE	76	585,20 a	392,20 a	193,01 a	176,63 a	238,17 b	147,60 a	0,78 a	38,01 a	25,10 a	2,07 a	2,70 a
		DET	0	595,73 a	397,49 a	198,33 a	174,77 a	229,50 c	172,90 a	0,78 a	25,01 a	26,36 a	2,07 a	2,77 a
		DEP	69	586,73 a	392,40 a	194,33 a	167,73 a	245,53 a	166,97 a	0,67 a	32,01 a	26,01 a	2,07 a	2,70 a
Cr2	80 – 90 +	SDE	84	813,01 a	603,01 a	210,01 a	104,50 a	82,50 a	57,67 a	1,27 a	30,01 a	15,78 a	2,31 a	2,70 a
		DET	0	818,93 a	633,13 a	185,80 b	100,47 a	80,60 a	55,47 a	1,27 a	29,67 a	16,99 a	2,31 a	2,80 a
		DEP	77	807,67 a	623,13 a	184,53 b	110,90 a	81,43 a	51,77 a	1,37 a	36,01 a	16,99 a	2,31 a	2,80 a
P3 – Luvissolo Crômico Órtico típico														
Cr1	38 – 60	SDE	72	559,80 a	334,67 a	225,13 a	181,80 a	258,40 c	212,53 a	0,70 a	17,67 a	37,46 a	1,72 a	2,73 a
		DET	0	490,93 b	288,27 b	202,01 b	217,70 a	291,37 a	216,77 a	0,73 a	25,67 a	32,36 c	1,72 a	2,50 c
		DEP	48	516,80 b	316,27 a	200,01 b	208,17 a	275,57 b	228,90 a	0,77 a	17,01 a	34,68 b	1,72 a	2,60 b
Cr2	60 – 70 +	SDE	79	556,33 b	306,87 b	249,47 a	192,67 a	251,01 a	193,73 a	0,77 a	23,01 a	33,28 a	1,80 a	2,70 a
		DET	0	578,27 b	361,80 a	216,47 b	179,83 a	241,90 a	196,07 a	0,73 a	18,67 a	33,36 a	1,80 a	2,73 a
		DEP	59	626,67 a	382,93 a	243,73 ab	156,23 a	217,10 a	186,17 a	0,70 a	13,67 a	31,62 a	1,80 a	2,70 a

¹Areia total, ²areia grossa, ³areia fina, ⁴silte, ⁵argila total, ⁶argila dispersa em água, ⁷relação silte:argila total, ⁸grau de flocculação, ⁹porosidade total, ¹⁰densidade do solo,

¹¹densidade de partículas, ¹²sem desagregação, ¹³desagregação total e ¹⁴desagregação parcia.

Tabela 5 – Propriedades químicas dos diferentes tratamentos da TFSA das amostras de saprolitos em de solos rasos no semiárido pernambucano.

Hor iz.	Trat.	¹ pH	² pH	³ ΔpH	⁴ P	⁵ Ca ²⁺	⁶ Mg ²⁺	⁷ K ⁺	⁸ Na ⁺	⁹ SB	¹⁰ T	¹¹ Al ³⁺	¹² H ⁺ Al	¹³ t	¹⁴ PST	¹⁵ V	¹⁶ m	¹⁷ COT
		H ₂ O	KCl	mg kg ⁻¹			mmol _c kg ⁻¹						%			-g kg ⁻¹		
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário																		
Cr1	¹⁹ SDE	6,5 a	4,3 ab	-2,1 a	26,0 b	27,8 a	43,2 a	9,0 b	5,1 a	85,1 a	102,7 a	4,4 a	17,6 a	89,5 a	4,9 b	82,8 a	4,9 a	7,3 a
	²⁰ DET	6,6 a	4,6 a	-2,0 a	53,9 a	28,1 a	42,9 a	11,0 a	5,5 a	87,5 a	101,8 a	4,1 a	17,6 a	91,6 a	5,4 ab	85,9 a	4,4 a	7,1 a
	²¹ DEP	6,6 a	4,1 b	-2,5 b	50,9 a	26,7 a	40,8 a	8,9 b	6,1 a	82,4 a	99,4 a	4,2 a	17,1 a	86,6 a	6,1 a	82,8 a	4,9 a	7,1 a
Cr2	SDE	6,4 b	4,1 b	-2,3 a	19,8 b	23,9 a	52,2 ab	6,6 b	7,6 a	90,4 b	110,2 a	4,6 a	19,8 a	94,9 ab	6,9 a	82,0 b	4,8 a	7,4 a
	DET	6,8 a	4,5 a	-2,3 a	58,4 a	25,9 a	54,9 a	9,0 a	7,9 a	97,7 a	114,2 a	4,6 a	19,8 a	102,3 a	6,9 a	85,6 a	4,4 a	7,0 a
	DEP	6,7 a	4,2 b	-2,5 a	68,5 a	23,9 a	45,0 b	8,6 a	7,5 a	85,0 b	98,8 b	3,3 b	18,7 a	88,3 b	7,6 a	86,1 a	3,7 a	6,6 a
P2 – Planossolo Háplico Sálco típico																		
Cr1	SDE	6,2 a	4,5 a	-1,8 a	48,2 b	117,3 a	142,6 a	2,0 b	27,9 b	289,8 a	296,4 a	1,9 a	6,6 a	291,8 a	9,4 a	97,8 a	0,7 a	1,1 a
	DET	6,1 a	4,4 a	-1,8 a	55,9 a	120,9 a	154,5 a	2,2 a	30,3 a	307,9 a	312,8 a	1,8 a	7,7 a	309,6 a	9,7 a	98,5 a	0,6 a	1,0 a
	DEP	6,2 a	4,3 b	-1,9 a	49,4 ab	125,5 a	152,7 a	2,2 a	29,8 a	310,2 a	315,7 a	1,8 a	6,6 a	311,9 a	9,4 a	98,3 a	0,6 a	0,8 a
Cr2	SDE	7,8 a	5,4 a	-2,5 a	387,9 a	94,5 a	79,9 a	1,6 a	12,2 a	188,1 a	185,4 a	1,1 a	0,6 a	189,2 a	6,5 a	100,0 a	0,6 a	0,1 a
	DET	8,1 a	5,4 a	-2,7 a	397,7 a	99,3 a	82,1 a	1,9 a	13,0 a	196,3 a	193,0 a	0,9 a	1,1 a	197,2 a	6,7 a	100,0 a	0,4 a	0,2 a
	DEP	7,9 a	5,3 a	-2,7 a	387,1 a	86,4 a	83,5 a	1,5 a	12,4 a	183,8 a	182,7 a	0,7 a	0,6 a	184,5 a	6,8 a	100,0 a	0,4 a	0,2 a
P3 – Luvissolo Crômico Órtico típico																		
Cr1	SDE	7,4 a	4,6 a	-2,8 a	1,6 a	201,1 c	231,7 b	1,7 c	8,2 c	442,7 c	455,4 c	0,3 a	12,7 a	443,1 c	1,7 b	97,2 a	0,2 a	2,8 a
	DET	7,3 a	4,4 c	-2,9 a	2,1 a	242,1 a	280,9 a	2,4 a	10,6 a	535,9 a	547,5 a	0,9 a	12,7 a	536,8 a	1,9 a	97,9 a	0,3 a	3,3 a
	DEP	7,5 a	4,5 b	-3,0 a	1,5 a	226,0 b	254,5 b	2,3 b	9,9 b	493,5 b	504,5 b	1,3 a	11,6 a	494,7 b	2,0 a	97,8 a	0,2 a	2,8 a
Cr2	SDE	7,5 a	4,6 a	-2,9 a	1,6 a	208,7 a	250,6 a	2,2 a	9,3 a	470,8 a	477,9 a	0,9 a	7,2 a	471,7 a	1,9 a	98,5 a	0,2 a	2,2 a
	DET	7,6 a	4,5 a	-3,0 ab	2,1 a	217,9 a	252,3 a	2,5 a	9,8 a	482,5 a	490,2 a	1,6 a	7,7 a	484,0 a	2,01 a	98,4 a	0,3 a	2,2, a
	DEP	7,6 a	4,6 a	-3,2 b	1,5 a	199,7 a	235,7 a	2,0 a	9,2 a	446,5 a	452,6 a	1,1 a	6,1 a	447,6 a	2,00 a	98,7 a	0,2 a	1,4 a

¹Potencial hidrogeniônico em água, ²potencial hidrogeniônico em KCl, ³diferença de potencial, ⁴fósforo disponível, ⁵cálcio trocável, ⁶magnésio trocável, ⁷potássio trocável, ⁸sódio trocável, ⁹soma de bases, ¹⁰capacidade de troca de cátions potencial, ¹¹alumínio trocável, ¹²acidez potencial, ¹³capacidade de troca de cátions efetiva, ¹⁴porcentagem de sódio trocável, ¹⁵saturação por bases, ¹⁶saturação por alumínio, ¹⁷carbono orgânico total, ¹⁸matéria orgânica, ¹⁹sem desagregação, ²⁰desagregação total e ²¹desagregação parci

4.6 Caracterização geoquímica

A análise geoquímica dos perfis de solo apresentados na Tabela 6, revela variações nos teores de elementos maiores e menores, refletindo os diferentes graus de intemperismo e composição mineralógica dos perfis e respectivos horizontes estudados. Os principais óxidos identificados foram dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de potássio (K_2O), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de cálcio (CaO), além de elementos menores como pentóxido de vanádio (V_2O_5), óxido de manganês (MnO), óxido de zinco (ZnO), óxido de cobre (CuO), entre outros.

Os elementos maiores são assim denominados devido à sua abundância na crosta terrestre. Nos perfis analisados, o silício (Si) é o elemento predominante, refletindo a composição dos diferentes materiais de origem. Os teores de SiO_2 são mais elevados nos horizontes superficiais (A) dos três perfis, com valores de 72,208% em P1, 59,707% em P2 e 53,506% em P3, o que pode estar relacionado à maior proporção da fração areia nesses horizontes.

Nos horizontes mais profundos, especialmente nos saprolíticos (Cr), observa-se uma leve redução nos teores de SiO_2 , atingindo 53,945% em P1, 54,431% em P2 e 52,014% em P3. A maior quantidade de SiO_2 nos horizontes superficiais em relação aos demais pode estar associada a um maior teor de quartzo, mais resistente ao intemperismo, enquanto outros minerais suscetíveis à alteração já foram removidos ou alterados.

Nos horizontes saprolíticos, apesar dos teores ainda elevados de SiO_2 , há a presença significativa de outros minerais primários, como feldspatos e minerais ferromagnesianos, que contribuem para o aumento dos teores de outros elementos em relação ao silício, indicando um menor grau de intemperismo em comparação com os horizontes superficiais.

O alumínio (Al) é o segundo elemento mais abundante nos três perfis. Os teores de Al_2O_3 são mais elevados nos horizontes subsuperficiais (Bt), com valores de 37,040% em P2 e 36,290% em P3. No P1, os teores de Al_2O_3 apresentam uma redução nos horizontes superficiais A e AC e uma elevação nos horizontes mais profundos, atingindo 34,28% em Cr1 e Cr2. Nos horizontes saprolíticos do P2 e P3, os teores de Al_2O_3 são menores do que no Bt, com valores de 36,027% em P2 e 35,857% em P3.

Em horizontes saprolíticos pouco intemperizados, os elevados teores de Al_2O_3 estão diretamente relacionados à composição da rocha matriz, refletindo a mineralogia original do material de origem (PINTO; KAMPF, 1997). O alumínio encontra-se predominantemente na

estrutura de minerais primários, como feldspatos (plagioclásios e ortoclásio), micas (muscovita e biotita) e anfibólios, que, devido ao estágio inicial de intemperismo, ainda não sofreram transformações significativas.

Embora o alumínio seja o segundo elemento mais abundante na geoquímica desses perfis, sua forma trocável é bastante reduzida, conforme indicado pelos baixos valores de alumínio trocável nesses solos. Esse comportamento sugere que o alumínio está, em grande parte, associado à estrutura cristalina de argilominerais, especialmente nas lâminas octaédricas e tetraédricas das argilas dos tipos 1:1 (caulinita) e 2:1 (ilita, esmectita e vermiculita), restringindo sua disponibilidade para os processos de troca iônica no solo (SILVA, 2023).

O ferro (Fe) é o terceiro elemento mais abundante nos três perfis, com maiores teores nos horizontes Bt e Cr, especialmente em P3. A elevada concentração de Fe_2O_3 nos horizontes subsuperficiais sugere a presença de minerais ferromagnesianos, sendo mais expressiva nos horizontes saprolíticos, que apresentam 6,869% em P1, 4,477% em P2 e 8,079% em P3.

A presença de Fe, tanto na estrutura de minerais primários quanto em (hidr)óxidos, influencia a dinâmica de nutrientes no solo. Em especial, quando ocorre como Fe_2O_3 (hematita) e FeOOH (goethita), que pode atuar na adsorção e disponibilização de fósforo e enxofre. Durante o intemperismo, o Fe_2O_3 se concentra principalmente em minerais secundários, como a hematita, que confere coloração avermelhada, e a goethita, responsável pela coloração amarelada.

Os elementos potássio (K), cálcio (Ca) e titânio (Ti) apresentam distribuição variável entre os perfis. O K_2O apresenta valores mais elevados no P2, chegando a 4,633% no horizonte A e 4,33% no Cr2, possivelmente devido à influência de minerais primários potássicos, como feldspatos e micas. O CaO apresenta maiores teores nos horizontes saprolíticos do P1 (0,992%) e do P3 (1,242%), sugerindo sua liberação a partir da alteração de minerais carbonáticos ou silicatos. O TiO_2 apresentou um aumento com a profundidade em P1 e P2, enquanto no P3 apresentou valores mais elevados na superfície.

O dióxido de titânio (TiO_2) é um componente relativamente estável no solo, geralmente associado a minerais resistentes ao intemperismo, como a rutilo, anatásio e ilmenita. Por ser pouco móvel, sua concentração tende a aumentar em horizontes mais intemperizados, onde outros elementos mais solúveis foram removidos. Sua presença pode estar ligada à herança da rocha matriz e a processos pedogenéticos, como a formação de argilas e a oxidação de minerais primários.

Tabela 6 – Geoquímica das amostras de saprolitos e solums rasos estudados no semiárido de Pernambuco.

Horiz.	¹ SiO ₂	² Al ₂ O ₃	³ Fe ₂ O ₃	⁴ K ₂ O	⁵ TiO ₂	⁶ CaO	⁷ BaO	⁸ ZrO ₂	⁹ MnO	¹⁰ V ₂ O ₅	¹¹ Ag ₂ O	¹² SrO	¹³ Rb ₂ O	¹⁴ ZnO	¹⁵ Y ₂ O ₃	¹⁶ CuO
%																
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário																
A	72.208	21.663	2.975	1.728	0.723	0.546	-	0.043	0.039	0.031	0.019	0.008	0.008	0.007	0,003	-
AC	68.861	23.358	4.287	1.952	0.835	0.546	-	0.040	0.038	0.035	-	0.008	-	0.007	0.005	-
Cr1	53.945	34.279	6.869	2.719	0.990	0.992	-	0.029	0.103	0.034	-	0.013	-	0.009	0.005	0.007
Cr2	53.904	34.279	6.799	2.883	0.999	0.945	-	0.026	0.099	0.041	-	0.010	-	0.011	0.006	-
P2 – Planossolo Háplico Sálco típico																
A	59.707	33.005	1.633	4.633	0.377	0.336	0.157	0.069	0.030	-	-	0.038	0.013	-	0.002	-
Bt	54.978	37.040	3.241	3.483	0.528	0.474	0.146	0.042	0.016	-	0.007	0.036	0.006	-	0.003	-
Cr1	54.431	36.027	4.097	3.501	0.587	0.937	0.221	0.042	0.074	-	0.009	0.052	0.008	0.006	0.008	-
Cr2	55.228	32.957	4.477	4.337	0.864	1.832	-	0.036	0.109	0.055	-	0.074	0.012	0.011	0.009	-
P3 – Luvisolo Crômico Órtico típico																
A	53.506	34.737	7.084	1.981	1.122	1.242	-	0.041	0.214	0.036	-	0.013	-	0.009	0.007	0.008
Bt	50.915	36.290	9.093	1.314	1.221	0.863	-	0.026	0.178	0.048	-	0.010	-	0.008	0.006	0.009
Cr1	52.014	35.857	8.079	1.746	1.092	0.984	-	0.031	0.0.138	-	0.023	0.012	-	0.008	0.006	0.011
Cr2	53.030	34.740	7.253	1.700	0.951	1.113	-	0.029	0.120	0.037	-	0.013	-	0.008	0.007	-

Legenda: ¹Dióxido de silício; ²Óxido de alumínio; ³Óxido de ferro; ⁴Óxido de potássio; ⁵Dióxido de titânio; ⁶Óxido de cálcio; ⁷Óxido de bário; ⁸ Dióxido de zircônio; ⁹Óxido de manganês; ¹⁰Pentóxido de vanádio; ¹¹Óxido de prata; ¹²Óxido de estrôncio; ¹³Óxido de rubídio; ¹⁴Óxido de zinco; ¹⁵Óxido de ítrio; ¹⁶Óxido de cobre.

Alguns elementos ocorrem em quantidades muito pequenas em todos os perfis e horizontes, incluindo zircônio (ZrO_2), estrôncio (SrO), ítrio (Y_2O_3). Seus teores são frequentemente inferiores a 0,1%, com destaque para o ZrO_2 variando de 0,026% e 0,069% e SrO entre 0,008% e 0,074%. O manganês (MnO) também apresentou predominantemente valores abaixo de 0,01% variando de 0,016% no P2 a 0,214% no P3.

O óxido de prata (Ag_2O) foi identificado exclusivamente nos horizontes A do P1, Bt e Cr1 de P2 e no horizonte Cr1 de P3. No geral os valores foram baixos variando de 0,02% a menos que 0,01%, possivelmente associado a processos secundários de intemperismo. Enquanto o óxido de bário (BaO) está presente apenas no P2, variando de 0,146% no horizonte Bt a 0,221%, no Cr1. Outros elementos como o vanádio (V_2O_5), rubídio (Rb_2O), zinco (ZnO) e cobre (CuO) aparecem apenas em determinados horizontes de alguns perfis com valores inferiores a 0,1%.

A distribuição geoquímica observada reflete a interação entre o material de origem, o grau de intemperismo e os processos pedogenéticos atuantes nos diferentes perfis analisados. Essa variação nos teores dos elementos químicos fornece subsídios importantes para a compreensão da evolução dos solos e de suas propriedades químicas e mineralógicas.

Dentre os elementos que ocorrem em quantidades muito pequenas, o ítrio (Y_2O_3) é classificado como um Elemento Terra Rara (ETR), sendo encontrado em teores baixos, mas representativos, nos perfis analisados. Além disso, os teores de vanádio (V_2O_5) e zinco (ZnO) estão dentro dos valores esperados para solos, enquanto o estrôncio (SrO) pode estar em níveis próximos ao limite superior do que normalmente se observa em materiais de intemperismo avançado. A presença desses elementos, mesmo em baixas concentrações, pode influenciar a dinâmica geoquímica do solo e a disponibilidade de nutrientes essenciais para a vegetação.

4.7 Mineralogia das frações

A distribuição mineralógica ao longo dos horizontes e entre as frações granulométricas reflete o estágio de desenvolvimento pedogenético dos solos, evidenciando diferentes níveis de intemperismo e mobilidade dos elementos. Conforme os solos evoluem, sua composição mineralógica passa a depender mais das condições ambientais de intemperismo do que a composição original do material parental (SANTOS, 2019).

A similaridade na composição mineral dos três perfis analisados sugere um baixo grau de evolução pedogenética, típico de solos rasos em ambientes semiáridos, onde a limitação da umidade reduz a intensidade do intemperismo e restringe a transformação mineral (CURI et al.,

2017). Em regiões áridas e semiáridas, a baixa precipitação e a alta evapotranspiração favorecem a preservação de minerais primários, retardando a neoformação de argilominerais e contribuindo para a manutenção de características mineralógicas herdadas do material parental.

A presença de minerais secundários nos horizontes saprolíticos evidencia o papel do saprolito na dinâmica e evolução desses solos, contribuindo para a retenção de nutrientes e influenciando suas propriedades químicas e físicas. A camada saprolítica é de grande importância na sustentação das atividades humanas, especialmente em solos com profundidade limitada, funcionando como fonte de minerais essenciais para os processos pedogenéticos (PARAHYBA et al., 2009; PEDRON et al., 2009).

De acordo com os resultados obtidos por meio das análises de difração de raios X, os solos analisados obtiveram uma uniformidade na presença de minerais primários nas frações areia e silte, sendo predominantemente constituídos por biotita (Bt), feldspatos (Fsp) e quartzo (Qtz), o que evidencia a forte influência do material de origem na constituição dos solos rasos e horizontes saprolíticos.

Já na fração argila, foram identificados minerais resultantes do intemperismo, como caulinita (Klt), goethita (Gth), vermiculita (Vrm) e esmectita (Smt). A assembleia mineralógica das frações é apresentada na Quadro 5, evidenciando a ocorrência de minerais primários e secundários nos diferentes perfis e horizontes analisados.

Quadro 5 – Constituintes minerais das frações areia, silte e argila dos perfis estudados.

Horiz	Areia	Silte	Argila pó	Argila orientada
P1 – Neossolo Litólico Eutrofico fragmentário				
A	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Vrm
AC	–	–	–	–
Cr1	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Vrm
Cr2	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Vrm
P2 – Planossolo Háplico Sáfico típico				
A	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca
Bt	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca
Cr1	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Smt
Cr2	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Smt
P3 – Luvisolo Crômico Órtico típico				
A	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca
Bt	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca
Cr1	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Smt
Cr2	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Mca – Qtz	Fsp – Gth – Klt – Mca	Klt – Mca – Smt

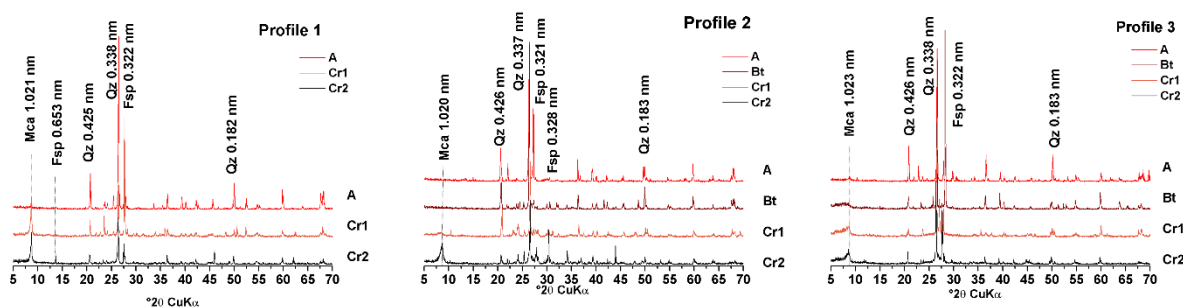
Legenda: Fsp – Feldspatos; Qtz – Quartzo; Klt – Caulinita; Gth – Goethita; Mca – Mica; Smt – Esmectita; Vrm – Vermiculita.

4.7.1 Fração Areia

Na fração areia, predominou os minerais primários micas (Mca), feldspatos (Fsp) e quartzo (Qtz) em todos os perfis e horizontes, preservando a mineralogia do material parental, o que sugere que o intemperismo não foi suficientemente intenso para transformar esses minerais primários.

Na Figura 11 é apresentado os gráficos com os picos de difração relativos ao espaçamento basal dos minerais identificados. O quartzo foi identificado nos diferentes perfis e horizontes pela presença dos picos em 0,182, 0,183, 0,337, 0,338, 0,425, 0,426 nm. Os feldspatos foram identificados pelos picos de difração em 0,321, 0,322, 0,328, 0,331, e 0,653 nm, evidenciando a presença de diversos feldspatos, tais como ortoclásios e plagioclásios (MOORE; REYNOLDS, 1997; SANTOS, 2011). Os minerais do grupo da mica foram identificados a partir dos picos 1,020, 1,021 e 1,023, além de 0,55 e 0,156 nm.

Figura 11 – Difratomogramas da fração areia dos perfis e horizontes estudados.



Fonte: organizado pelo autor, 2025.

Nos três perfis, a presença uniforme da biotita nos horizontes superficiais reforça o baixo grau de intemperismo, sem evidências de transformação significativa dos minerais primários, visto que este mineral é mais susceptível ao intemperismo. A ocorrência do quartzo e de alguns feldspatos pode ser explicada pela maior resistência ao intemperismo, especialmente quando comparada a outros minerais silicatados.

De acordo com a série de Goldich (1938), o quartzo, assim como o grupo dos feldspatos potássicos, é mais resistente ao intemperismo o que favorece sua ocorrência na fração areia. Esse mineral, devido à sua elevada suscetibilidade à hidrólise, quando presente nas frações mais finas dos solos, pode sinalizar uma condição de disponibilização de nutrientes vegetais em um curto a médio prazo (MELO et al., 2004; SANTOS, 2011). No caso dos solos analisados, a mineralogia da fração areia reflete as diferentes litologias.

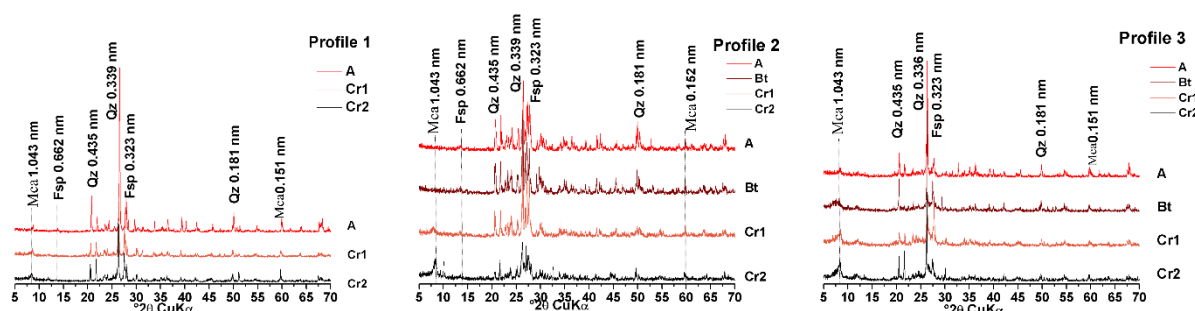
Na fração areia dos horizontes saprolíticos, já se esperava a presença de minerais primários de mais fácil intemperização, visto que esses horizontes preservam parte da estrutura e composição mineralógica do material de origem. Já a presença desses minerais nos horizontes superficiais e diagnósticos, como A e Bt, reforça o baixo grau de intemperismo desses solos.

4.7.2 Fração Silte

Os difratogramas da fração silte (Figura 12) revelaram uma composição mineralógica dominada por minerais primários, seguindo o mesmo padrão encontrado na fração areia. O quartzo apresentou picos em 0,181, 0,336, 0,339 e 0,435 nm, enquanto os feldspatos exibiram picos em 0,323 e 0,662 nm. Já a biotita mostrou um pico mais intenso em 1,043 nm nos diferentes perfis e horizontes, além de picos menores em 0,151 e 0,152 nm.

A análise da fração de silte, por DRX, confirma a predominância de minerais herdados do material parental, com baixa transformação mineralógica, reforçando a hipótese de intemperismo incipiente nos perfis estudados.

Figura 12 – Difratogramas da fração silte dos perfis e horizontes estudados.



Fonte: organizado pelo autor, 2025.

O quartzo e os feldspatos no geral apresentaram picos bem definidos e de alta intensidade devido à sua estrutura bem ordenada e estabilidade química, o que facilitou sua detecção. Os picos de difração observados em 1,043 nm e em 0,151–0,152 nm são característicos do grupo das micas, indicando a presença de minerais com estrutura lamelar.

O pico mais intenso em 1,043 nm corresponde ao espaçamento basal (d001), típico de micas potássicas como a biotita, muscovita ou illita. Já os picos secundários de menor intensidade pode estar associados a planos cristalográficos distintos ou a variações na composição química, como substituições isomórficas e diferentes graus de intemperismo.

4.7.3 Fração Argila

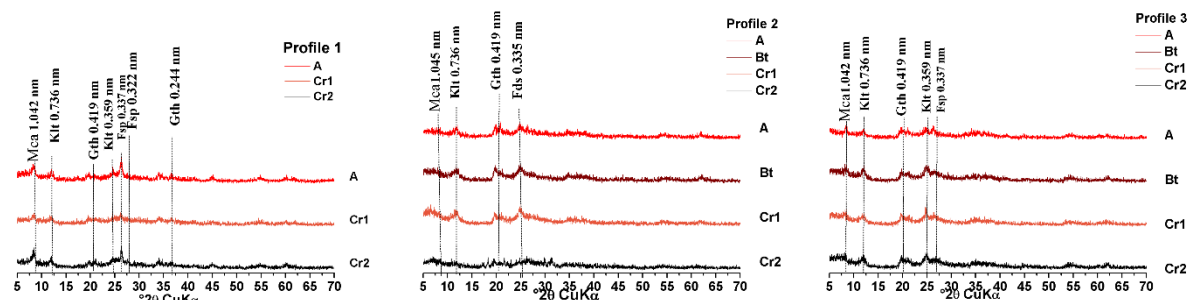
Os difratogramas da fração argila não-orientada (Figura 13) revelaram parte da composição mineralógica predominante na fração argila dos diferentes horizontes, dos três

perfis estudados, sendo identificado essencialmente a presença de minerais secundários como a caulinita (Klt) e a goethita (Gth), e primários como a biotita e os feldspatos.

A coexistência de minerais primários, como biotita e feldspatos, com minerais secundários, como caulinita e goethita, indicando um estágio de intemperismo moderado, sugere que a degradação química desses minerais ainda está em andamento, o que caracteriza uma pedogênese relativamente jovem. A presença de minerais primários na fração argila é comum em solos rasos pouco intemperizados (SANTOS et al., 2022; SILVA, 2023).

A presença de caulinita foi confirmada em ambos os horizontes de todos os perfis, tanto na fração orientada quanto na fração não orientada, por meio dos espaçamentos próximos a 0,736 nm e 0,359 nm. A identificação da caulinita foi reforçada pelo colapso dos picos de aquecimento após a 550°C.

Figura 13 – Difratomogramas da fração argila não orientada dos perfis e horizontes estudados.



Fonte: Organizado pelo autor, 2025.

A caulinita é um argilomineral resultante geralmente da alteração do feldspato e biotita (DIXON, 1989), refletindo um processo progressivo de alteração mineral. Em ambientes semiáridos, sua formação ocorre predominantemente por neoformação, um processo no qual feldspatos e micas sofrem intemperismo, levando à cristalização da caulinita. Essa característica é favorecida pela alternância entre longos períodos de estiagem e eventos chuvosos, que promovem ciclos de dissolução e reprecipitação de minerais, contribuindo para a estabilização da caulinita no solo (DIXON, 1989; THOMAS, 1974).

Os feldspatos identificados na fração de argila apresentaram picos de difração abaixo de 0,337 nm, indicando que apenas os planos internos da estrutura cristalina permanecem preservados. Isso pode estar relacionado ao intemperismo mais avançado dessa fração, resultando na perda parcial da estrutura original desses minerais. Além disso, a presença de feldspato na fração argila costuma estar associada à argila grossa, especialmente em contextos em que o intemperismo ainda não promoveu sua total transformação em minerais secundários (DREES et al., 1989).

Os conteúdos de feldspatos nas frações de areia, silte e argila são descritos por Huang (1989) e Santos (2012) como um fator preponderante na neoformação de caulinita em solos de regiões semiáridas, devido ao intemperismo químico progressivo que transforma feldspatos em argilominerais secundários, como a caulinita.

A presença da mica na fração de argila de Luvisolos, conforme identificado por Silva (2022), pode indicar um estágio mais avançado de intemperismo em comparação aos demais solos, estando possivelmente associada à transição para vermiculita como fase intermediária no processo de alteração mineralógica.

A goethita ocorreu apenas na argila não-orientada apresentando picos característicos nas faixas de 0,419 nm e 0,244 nm, reflexões típicas de seus planos cristalográficos mais comuns, confirmando sua presença como um produto da oxidação do ferro liberado durante o intemperismo dos minerais primários.

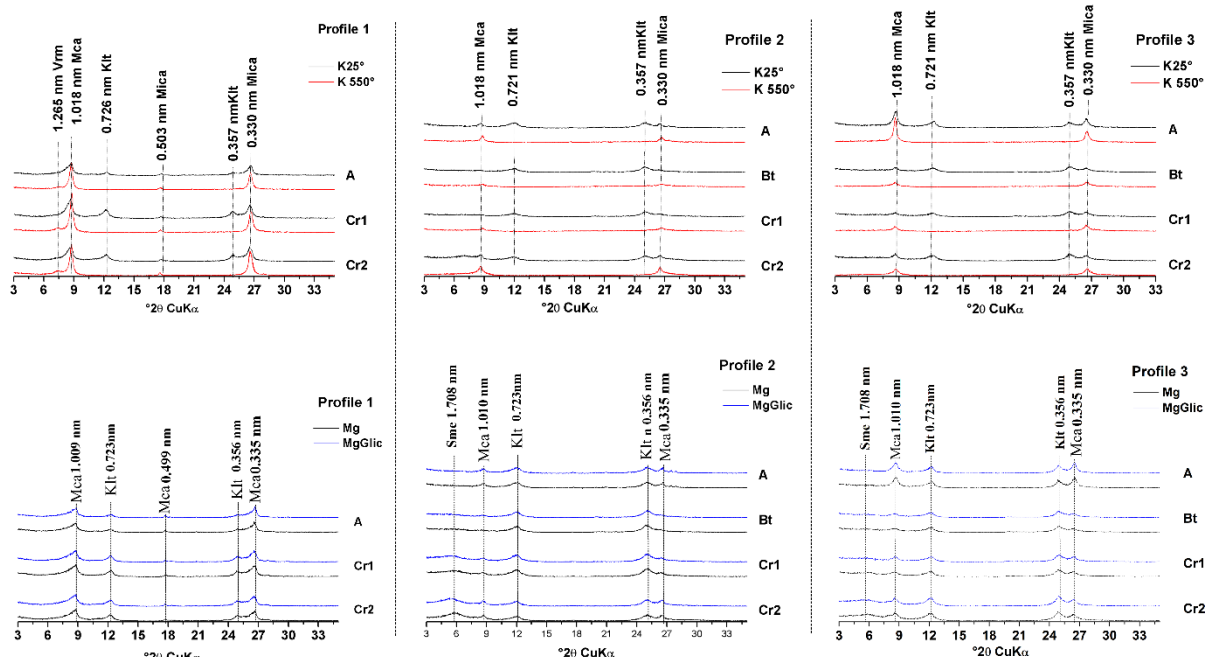
No difratogramas da argila orientada, observa-se uma diferenciação mais evidente entre os solos e ao longo dos perfis, refletindo tanto a presença de minerais expansivos quanto os processos de translocação e neoformação de argilas.

No P1, o difratograma da argila orientada apresentou uma composição mineral que inclui illita, caulinita e vermiculita, sendo a presença da vermiculita um indicativo de um estágio inicial de alteração da biotita. No entanto, não há evidência da formação de esmectita, indicando que o intemperismo ainda é incipiente da vermiculita, sem uma transformação mineral significativa para argilominerais mais expansivos.

Na argila orientada de P2 e P3, os horizontes superficiais (A e Bt) contêm micas e caulinita, enquanto nos horizontes mais profundos (Cr1 e Cr2) também há presença de esmectita. Como os horizontes Cr1 e Cr2 desses perfis ainda apresentam minerais alteráveis, como biotita e feldspatos, é possível que a esmectita tenha sido formada *in situ*, resultando da alteração desses minerais primários. Dessa forma, a presença de esmectita nesses horizontes pode refletir uma combinação de processos, envolvendo tanto a mobilização vertical de argilas quanto a sua formação direta a partir da transformação de minerais do material parental.

A presença de vermiculita na fração de argila orientada do P1 foi confirmada pelos espaçamentos próximos a 1.265 nm. Sua identificação foi reforçada pelo colapso dos picos após aquecimento a 550°C, após saturação com potássio, um comportamento típico desse argilomineral devido à perda de água interlamelar e cátions hidratados. Esse tratamento permitiu diferença de outros minerais expansivos, como a esmectita (Figura 14).

Figura 14 – Difratogramas da fração argila orientada dos perfis e horizontes estudados.



Fonte: Organizado pelo autor, 2025.

Já a esmectita, identificada nos horizontes saprolíticos do P2 e P3, apresentou picos basais em 1.708 nm. A confirmação desse mineral foi obtida pelo tratamento com magnésio e magnésio + solvatação com etilenoglicol, que evidencia seu comportamento expansivo. Com saturação em magnésio, a esmectita manteve um espaçamento basal próximo a 1,4 nm, mas ao ser tratada com glicerol, expandiu para 1,7 nm (DIXON, 1985; MOORE; REYNOLDS, 1997).

Para Santos (2011), a presença de minerais 2:1 expansíveis do grupo das esmectitas pode ser explicada por meio da neogênese, expressa pelo processo de bissialitização, que indica um estágio inicial de hidrólise incipiente. Já Thomas (1974) ressalta que esse processo geralmente resulta na formação da montmorilonita, um mineral pertencente ao grupo das esmectitas, sendo considerado a forma mais comumente encontrada desse argilomineral nos solos.

Com base nos resultados mineralógicos, a caulinita foi identificada como o principal argilomineral presente no perfil, ocorrendo tanto nos horizontes superficiais quanto no saprolito. Ao comparar esses dados com o teor total de argila, bem como com as análises químicas e mineralógicas, observa-se que a presença de argilas de alta atividade (2:1) nos horizontes Bt do P2 e P3 é provavelmente limitada a uma menor proporção da fração de argila.

5 CONCLUSÕES

Este estudo permitiu caracterizar de forma integrada os atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos dos solums rasos e dos respectivos saprolitos desenvolvidos sobre rochas cristalinas no semiárido pernambucano. Os resultados indicam que os saprolitos, apesar de historicamente negligenciados nos estudos pedológicos e no uso agrícola, apresentam atributos relevantes que ampliam o potencial agrônômico e ambiental desses solos no semiárido.

Constatou-se que os horizontes saprolíticos exibem maior concentração de nutrientes essenciais, como fósforo e bases trocáveis, além de baixa saturação por alumínio e sódio. Esses atributos químicos conferem aos saprolitos um papel estratégico na fertilidade do solum e para o uso agrícola em regiões semiáridas.

A alta concentração de fósforo nos horizontes saprolíticos desses solos em comparação aos horizontes superficiais indica uma reserva importante desse nutriente, que geralmente é reconhecido por sua carência nos ambientes tropicais, especialmente em regiões semiáridas onde o fósforo superficial é escasso.

Os resultados mineralógicos confirmam a presença de argilas do tipo 2:1, como a esmectita, especialmente nos saprolitos, o que favorece a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes. Além disso, a preservação parcial da mineralogia original reforça a baixa evolução pedogenética desses solos, mantendo uma reserva importante de minerais como micas e feldspatos, herdados do material de origem.

A presença de caulinita nos três perfis reforça a transformação progressiva de feldspatos e micas, enquanto a ocorrência de argilas expansivas, como esmectita, nos horizontes saprolíticos do P2 e P3 sugere a influência de processos de neoformação e translocação mineral.

Do ponto de vista físico, os saprolitos apresentam alta densidade em função da estrutura original pouco alterada, mas ainda assim mostram-se acessíveis ao enraizamento, como evidenciado pela presença de raízes. Isso sugere que, mesmo com limitações estruturais, esses horizontes contribuem para o abastecimento hídrico e nutricional das plantas.

Os tratamentos aplicados à TFSA mostraram pouca interferência nos resultados químicos, mas indicaram que desagregações mais intensas podem favorecer a redistribuição de partículas e aumentar a disponibilidade de certos nutrientes.

A análise comparativa entre os solums e saprolitos evidenciou que os saprolitos possuem atributos químicos mais favoráveis à nutrição vegetal.

Assim, ao se avaliar os conjuntos solo-saprolito, percebe-se que diferentes classes de solos rasos apresentam potencialidades distintas, que podem ser melhor aproveitadas a partir da compreensão integrada dos atributos do solum + saprolito. Isso é importante para pequenos agricultores e camponeses que manejam essas áreas, geralmente classificadas como de baixa aptidão agrícola.

Portanto, os horizontes saprolíticos demonstram-se promissores tanto para o manejo agrícola quanto para a conservação ambiental, ampliando as possibilidades de uso sustentável do solo no semiárido. Práticas como os Sistemas Agroflorestais (SAFs) podem ser alternativas eficazes para aproveitar tais atributos, pois permitem uma maior ciclagem de nutrientes no sistema Solum-saprolito, conciliando produção e conservação.

Dessa forma, ainda que os solums rasos apresentem limitações específicas, sobretudo ligadas aos atributos físicos, os horizontes saprolíticos revelam características químicas e mineralógicas favoráveis, que contribuem significativamente para ampliar o uso agrícola desses solos no semiárido.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, Aziz Nacib. **Nordeste sertanejo: a região semi-árida mais povoada do mundo**. Estudos Avançados, v. 13, n. 36, p. 60-61, 1999. Tradução. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v13n36/v13n36a03.pdf>. Acesso em: 09 out. 2023.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê editorial, 2003.

AGBENIN, J. O.; TIESSEN, H. Phosphorus along a semi-arid tropical catena. **Geoderma**, v. 62, p. 345 – 362, 1994. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90098-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90098-1)

ANDERSON, S. P.; BLUM, J.; BRANTLEY, S. L.; CHADWICK, O.; CHOROVER, J.; DERRY, L. A.; WHITE, A. E. A iniciativa proposta estudaria o motor de intemperismo da Terra. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 85 (28), 265-269, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004EO280001>

ANDRADE, M. C. D. O.; SAMPAIO, F. A. C.; NETO, J. C. X. A.; JATOBA, L.; ALBUQUERQUE, M. J. C.; BENJAMIN, R. C.; LINS, F. J. C. C. **Atlas Escolar Pernambuco: espaço geo-histórico e cultural**. Grafset, João Pessoa. p. 160, 2003.

ARAÚJO FILHO, J.A.; CARVALHO, F.C. Desenvolvimento sustentado da caatinga. In: Alvarez, V.H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M.P.F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS; UFV, DPS. p. 125–133, 1996.

ARKLEY, R.J. Soil moisture use by mixed conifer forest in a summer-dry climate. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 45, p. 423–427, 1981.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020037x>

ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141 – 149, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200003>

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. **Tendências recentes na dinâmica da vegetação na América do Sul e sua relação com a precipitação**. *Nat Hazards* 77, 883–899, 2015.

BARBOSA, T. A.; GOMES FILHO, R. R. Biodiversidade e conservação da Caatinga: revisão sistemática. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 7, 177–189, 2022.
<https://doi.org/10.24221/jeap.7.4.2022.5228.177-189>

BARRETO, A. B.; TAVARES, D. D.; SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; MARTINS, A. F.; PEREIRA, W. E. Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.7, n.3. 010–019, 2019.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3575228>

BATISTA, P. V.; EVANS, D. L.; CÂNDIDO, B. M.; FIENER, P. Does soil thinning change soil erodibility? An exploration of long-term erosion feedback systems. **Soil**, 9(1), 71–88, 2023.
<https://doi.org/10.5194/soil-9-71-2023>

Becker, G.F. A reconnaissance of the goldfields of the southern Appalachians. Lansing: Universidade de Michigan; U.S. **Government Printing Office**. p. 85, 1895.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos. p. 898, 1989.

BREVIK, EC, CALZOLARI, C.; MILLER, BA, PEREIRA, P.; KABALA, C.; BAUMGARTEN, A.; JORDÁN, A. Mapeamento de solos, classificação e modelagem pedológica: História e direções futuras. **Geoderma**, 264, 256–274., 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification. In: BRINDLEY, G.W; BROWN, G. **London: Mineralogical Society**, chapter 5, p.305–360, 1980.

BUAINAIN A.M.; GARCIA J.R. “Capítulo V: Pobreza Rural e Desenvolvimento do Semiárido Nordeste: Resistência, Reprodução e Transformação”, In BUAINAIN A.M., DEDECCA C. (orgs.), *A nova cara da pobreza rural: desenvolvimento e a questão regional*, Série Desenvolvimento Rural Sustentável, v. 17, Brasília IICA, fevereiro/2013.

BUOL, S. W. **Saprolite taxonomy network**. (Circular n.0 2). 1989.

BUOL, S. W.; WEED, S. B. Saprolite-soil transformations in the Piedmont and Mountains of North Carolina. **Geoderma**, Amsterdam, v. 51, n. 1/4, p. 15–28, 1991.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90064-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90064-Z)

BUOL, S.W. Saprolite-regolith taxonomy: an approximation. In: CREMEENS, D.L.; BROWN, R.B.; HUDDLESTON, J.H. (Ed.). *Whole regolith pedology*. Madison: **Soil Science Society of America**. p. 119-132, 1994.

CALVERT, C. S.; BUOL, S. W.; WEED, S. B. Mineralogical Characteristics and transformations of a vertical rock-saprolite-soil sequence in the North Carolina Piedmont: I. Profile morphology, chemical composition, and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 1096-1103, 1980.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050044x>

CÂMARA, E. R. G.; DOS SANTOS, J. C. B.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; CORREA, M. M.; FERREIRA, T. O.; SOUZA, J. E. S.; DE SOUZA JUNIOR, V. S. Parent rock–pedogenesis relationship: How the weathering of metamorphic rocks influences the genesis of Planosols and Luvisols under a semiarid climate in NE Brazil. **Geoderma**, v. 385, p. 114878, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114878>

CANO W. **Desequilíbrios regionais e concentração industrial no Brasil 1930-1995**, 2ª edição, Campinas, Editora Unicamp, 1998.

CHRISTOPERSON, R.; BIRKELAND, G. H. **Geossistemas: Uma Introdução à Geografia Física**. 9ª edição, 2017.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**, 2017.

CORDEIRO, Joel Maciel Pereira; OLIVEIRA, AG de. Levantamento fitogeográfico em trecho de Caatinga hipoxerófila--Sítio Canafístula, Sertãozinho--Paraíba, Brasil. **OKARA: Geografia em debate**, v. 4, n. 1-2, p. 54-65, 2010.

COSTA JUNIOR, C.; CÁSSIA PICCOLO, M. D.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B. D.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, 1241-1252, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400017>

COSTA, E. U. C.; SANTOS, J. C. B.; AZEVEDO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J.C.A.; CORREA, M.M.; NEVES, L.V.M.W.; VIDAL-TORRADO, P.; JÚNIOR, S. Mineral alteration and genesis of Al-rich soils derived from conglomerate deposits in Cabo Basin, NE Brazil. **Catena** 167, 189–211, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.039>

CURI, N. C.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**, 2017.

DELVIGNE, J.E. **Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering** **Ottawa: Mineralogical Association of Canada**. p. 494, 1998.

DIXON, J. B. Kaolin and Serpentine Group Minerals. In: Minerals in Soil Environments Second Edition, DIXON, J.B; WEED, S.B. **Soil Science Society of America**, Inc, p. 467, 1985. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c10>

DIXON, J. B.; WEED, S. B. Minerals in soil environments. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America. 2. ed. p. 1244, 1977.

DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J.B. WEED, S.B.; eds. Minerals in soils environments. 2.ed. Madison, **Soil Science Society of America**. p.439-525, 1989.

DREES, L.R.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; SENKAY. A.L. Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs. p. 913–974. In J.B. Dixon and S.B. Weed (ed.) **Minerals in soil environments**. 2nd ed. SSSA Book Ser. 1. SSSA, Madison, WI, 1989. <https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c19>

DRIESE, S. G.; MCKAY, L. D. Epi-fluorescence micromorphology of saprolite reveals evidence for colloid retention in microscale pore systems. **Geoderma**, 121(1-2), 143-152, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.006>

FERNANDES, MF.; CARDOSO, D.; QUEIROZ, L.P; An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. **Journal of Arid Environments**. 174, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104079>

FORTESCUE, J. A. Landscape geochemistry: retrospect and prospect 1990. **Applied Geochemistry**, 7(1), 1-53, 1992. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(92\)90012-R](https://doi.org/10.1016/0883-2927(92)90012-R)

GARDNER, L.R.; KHEORUENROMNE, I.; CHEN, H.S. Isovolumetric geochemical investigation of a buried granite saprolite near Columbia, SC, U.S.A. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Amsterdam, v. 42, n. 4, p. 417-424, 1978. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90273-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90273-9)

GARIGLIO, M.A.; SAMPAIO, E.V.S.B.; CESTARO, L.A.; KAGEYAMA, P.Y. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. 2.ed. Brasília, DF: **Serviço Florestal Brasileiro**, v. 67, p.205-213, 2010.

GRAHAM, R.C.; TICE, K.R.; GUERTAL, W.R. The pedologic nature of weathered rock. In: Whole regolith pedology. **Soil Scienc Society of America**, USA, 22-40, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub34.c2>

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 36: 909-920, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300021>

GUERRA, A. R. **Saprólitos na região Sudeste do Brasil: morfologia, classificação e evolução física-geoquímica-mineralógica**. 2015. Tese (Doutorado em ciências do solo e nutrição de plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

HOLANDA LEITE, M. J. Características gerais dos principais solos da região semiárida. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar**, 3(10), 2022. <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i10.1964>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acesso em: 30/09/2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Manuais técnicos em geociências, 2012.

INSTITUTONACIONAL DO SEMIÁRIDO (Campina Grande). Sobre o INSA. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br>. Acesso em: 17 setembro. 2023.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advance Course**. 29. ed. Madison, p. 895, 1975.

JACKSON, R. B. **A importância das distribuições de raízes para a hidrologia, biogeoquímica e funcionamento do ecossistema**, 1999.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In: Alvarez, V.H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M.P.F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS: UFV, DPS. p. 95–133, 1996.

JAKELAITIS, A.; DA SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 38(2), 118-127, 2008.

JIN, K.; WHITE, PJ, WHALLEY, WR, SHEN, J.; SHI, L. Moldando um solo ótimo pela interação raiz-solo. **Trends in Plant Science**, 22 (10), 823-829, 2017.

JUILLERET, J.; DONDEYNE, S.; VANCAMPENHOUT, K.; DECKERS, J.; HISSLER, C. Mind the gap: a classification system for integrating the subsolum into soil surveys. **Geoderma** 264, 332–339, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.031>

JUILLERET, J.; AZEVEDO, A. C.; SANTOS, R. A.; SANTOS, J. C.; PEDRON, F. D. A.; DONDEYNE, S. Where are we with whole regolith pedology? A comparative study from Brazil. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 35, n. 4, p. 251-261, 2018. <https://doi.org/10.1080/02571862.2017.1411537>

JUILLERET, J.; DONDEYNE, S.; HISSLER, C. What about the regolith, the saprolite and the bedrock? Proposals for classifying the subsolum in WRB. In: EGU **General Assembly Conference Abstracts**. p. 2716, 2014.

KAMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. **Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo**. Química e mineralogia do solo parte I - conceitos básicos. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

KEIM, C. N.; NALINI JR, H. A.; LENA, J. C. Manganese oxide biominerals from freshwater environments in Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Geomicrobiology Journal**, v. 32, n. 6, p. 549-559, 2015. <https://doi.org/10.1080/01490451.2014.978513>

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**, 2015.

KOITER, A. J.; OWENS, P. N.; PETTICREW, E. L.; LOBB, D. A. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes. **Catena**, 153, 194-206, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.024>

KÖPPEN, W.P. **Grundriss der Klimakunde**. 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter. p. 388, 1931.

KRETZSCHMAR, R.; ROBARGE, W.P.; AMOOZEGAR, A. Influence of natural organic matter on colloid transport through saprolite. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n. 3, p. 435-445, 1995. <https://doi.org/10.1029/94WR02676>

LAPANJE, A.; WIMMERSBERGER, C.; FURRER, G.; BRUNNER, I.; FREY, B. Pattern of elemental release during the granite dissolution can be changed by aerobic heterotrophic bacterial strains isolated from Damma Glacier (Central Alps) deglaciated granite sand. **Microbial Ecology**, New York, v. 63, n. 4, p. 865-882, 2012.

LEINZ, V.; CAMPOS, J.E.S. **Guia para determinação de minerais**. 8. ed. São Paulo: Nacional. p. 149, 1979.

LEPSCH, Igo F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2021.

LIMA, R. H. d. **Caracterização de perfis de regolito e formação de carbonatos em saprolitos derivados de gnaiss no semiárido de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.

LIN, H. Zona Crítica da Terra e hidropedologia: conceitos, características e avanços. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2010.

LOPES, I.; SANTOS, S.; LEAL, B. G.; MELO, J. M. M. Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 10(4), 1014-1026, 2017.

MACHADO, S. R. V. **Caracterização química, física e mineralógica de saprolitos do estado de São Paulo e suas implicações na taxonomia e uso agrícola**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 1996.

MAIO, L. M. M.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; PRATES, F. B. S.; RODRIGUES, M. N.; SILVA, H. P.; DIAS, A. N.; FREITAS, C. E. S. Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, v. 58, n. 6, p. 823-830, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000600021>

MANNING, D.A.C.; RENFORTH, P. Passive sequestration of atmospheric CO₂ through coupled plant-mineral reactions in urban soils. **Environmental Science & Technology**, Whashington, v. 47, n. 1, p. 135-141, 2013. <https://doi.org/10.1021/es301250j>

MATALLO JR, H.; SCHENKEL, C. **A desertificação no mundo e no Brasil. Desertificação**. Brasília: UNESCO. 2003.

MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion Adsorption in Ferruginous Tropical Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, v. 36, n. 2, p. 296-300, 1972. <https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600020027x>

MELO, G.W.; MEURER, E.J. PINTO, L.F.S. Fontes de Potássio em Solos Distrofêricos Cauliníticos Originados de Basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:597-603, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000400002>

MEDEIROS, R. M. Balanço Hídrico E O Aquecimento No Município De Caruaru–PE, Brasil. **Revista Equador**, v. 7, n. 2, p. 126-146, 2018. <https://doi.org/10.26694/equador.v7i2.7647>

METZ, B.; DAVIDSON, O.; DE CONINCK, H.; LOOS, M.; MEYER, L. **Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas**, relatório especial sobre captura e armazenamento de dióxido de carbono. Cambridge, Reino Unido e Nova York, EUA, 2005.

MINARD, J.P. Recent saprolite: thick saprolite has formed in northern New Jersey since the last Pleistocene glacial stage. **Science**, New York, v. 129, n. 3357, p. 1206-1209, 1959. <https://doi.org/10.1126/science.129.3357.1206>

MOMOLI, R. S.; COOPER, M. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1295-1305, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900029>

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. X-ray diffraction and identifications and analysis of clay minerals. 2nd ed. **Oxford: Oxford University Press**. P. 400, 1997.

MOURA, M. S. B.; GALVINCIO, J. D.; Brito, L. D. L.; Souza, L. D.; SÁ, I. D. S.; Silva, T. G. F. **Clima e água de chuva no Semi-Árido**, 2007.

MOURA, M. S. B.; SOBRINHO, J.; SILVA, T. G. F. **Aspectos metereológico do semiárido brasileiro**, 2019.

MURPHY, S.F.; BRANTLEY, S.L.; BLUM, A.E.; WHITE, A.F.; DONG, H. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Amsterdam, v. 62, n. 2, p. 227–243, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00336-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00336-0)

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; DE OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 136-145, 2019.

<https://doi.org/10.5965/223811711812019136>

NOVAIS, F.R.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV. p. 399, 1999.

OLIVEIRA, F. P. D.; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; MINELLA, J. P. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16, 337-346, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400002>

OLIVEIRA, J. B. Classificação de solos e seu emprego agrícola e não agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29.; 2003, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: SBCS. p. 17-20, 2003.

OLIVEIRA, L. B. D.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1333-1345, 2009.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500026>

PARAHYBA, R.B.V.; SANTOS, M.C. ROLIM NETO, F.C. Evolução quantitativa de Planossolos do Agreste do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, p. 991-999, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400023>.

PEDRON, F. A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e Neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2007. 160 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; STÜRMER, S. L. K.; MENEZES, F. P. Morfologia e classificação taxonômica de Neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 119-128, 2009.

http://dx.doi.org/10.1590/s0100_06832009000100013.

PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. Balanço geoquímico de solos derivados de rochas básico-ultrabásicas no ambiente subtropical do Rio Grande do Sul. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 21, p. 651-658, 1997. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000400016>

QUEIROZ, L. P. D.; RAPINI, A.; GIULIETTI, A. M. **Rumo ao amplo conhecimento da biodiversidade do semiárido Brasileiro**, 2006.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, vol. 27, p. 29-48, 2003.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 32, 1805-1816, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

RICE, T. J. B.; BUOL, S. W.; WEED, S. B. Soil-saprolite profiles derived from mafic rocks in the North Carolina Piedmont: I. Chemical, morphological, and mineralogical characteristics and transformations. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v. 49, n. 1, p. 171-178, 1985. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900010035x>

RICHTER, D. D.; BILLINGS, S. A. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone. **New Phytologist**, 206(3), 900-912, 2015. <https://doi.org/10.1111/nph.13338>

SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: EMBRAPA Semiárido, 2010.

SANTOS, A. G. N. Influência Do Saprolito Para A Potencialidade De Solos Rasos: Classificação, Análises Químicas E Construção De Um Novo Sistema De Descrição Morfológica De Saprolitos De Pernambuco. In: XXXI CIC - Congresso de Iniciação Científica-UFRPE, 2022.

SANTOS, J. C. B. **Saprolitologia aplicada à gênese e às implicações ambientais de regolitos do Estado de Pernambuco**. 2015. Tese (Doutorado em ciência do solo) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

SANTOS, J. C. B.; LE PERA, E.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; AZEVEDO, A. C. 2017. Gneiss saprolite weathering and soil genesis along an east–west regolith sequence (NE Brazil). **Catena** 150, 279–290, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.031>

SANTOS, J.C.B.; LE PERA, E.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; OLIVEIRA, C.S.; JUIILLERET, J.; CORRÊA, M.M.; AZEVEDO, A.C. Porosity and genesis of clay in gneiss saprolites: The relevance of saprolithology to whole regolith pedology. **Geoderma** 319, 1–13, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.031>

SANTOS, P. G. Mineralogia, gênese e relações pedogeomórficas de solos desenvolvidos de litologias das formações Pirambóia, Sanga-do-Cabral e Guará na região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina**, 2015.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS; SNLCS. p. 100, 2015.

SCHOLTEN, T. Hydrology and erodibility of the soils and saprolite cover of the Swaziland Middleveld. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 247-262, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(97\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(97)00011-1)

SIDERSKY, P.; JALFIM F.; RUFINO E. Combate à pobreza rural e sustentabilidade no semiárido nordestino: a experiência do Projeto Dom Helder Câmara”, **Revista Agriculturas: experiências em agroecologia**, vol. 5, nº 4, p. 23-28, 2008.

SILVA, A. H. N. **Mineralogia de Luvisolos formados de anfibolito, na região semiárida do Brasil**. 2022. Dissertação (Mestrado em ciência do solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.

SILVA, F. H. B. B.; DA SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C. **Descrição das principais classes de solos**, 2006.

SILVA, P. C. G. **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.

SILVA, P. C. G.; Moura, M. S. B.; Kiill, L. H. P.; Brito, L. D. L., Pereira, L. A.; Sá, I. B.; CLÓVIS GUIMARÃES FILHO, E. P. D. E. S. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos, 2010.

SILVA, T. M. P. **Elementos Terras Raras E Fósforo Disponível Em Sistemas Solo-Saprolito Derivados De Rochas Metamórficas**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

SILVA, Y. J. A. B.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; VAN STRAATEN, P.; BIONDI, C. M.; DE SOUZA JÚNIOR, V. S.; SILVA, Y. J. A. B. Effect of I-and S-type granite parent material mineralogy and geochemistry on soil fertility: A multivariate statistical and Gis-based approach. *Catena*, 149, 64-72, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.001>

STERNBERG, P. D.; ANDERSON, M. A.; GRAHAM, R. C.; BEYERS, J. L.; TICE, K. R. Root distribution and seasonal water status in weathered granitic bedrock under chaparral. *Geoderma*, Amsterdam, v. 72, p. 89-98, 1996.

STOLT, M.H.; BAKER, J. C. Strategies for studying saprolite and saprolite genesis. In: Whole regolith pedology. **Soil Scienc Society of America**, USA, 1-19, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub34.c1>

STONE, E. L.; COMERFORD, N. B. Plant and animal activity below the solum. In: CREMEENS, D.L.; BROWN, R.B.; HUDDLESTON, H. (Ed). Whole regolith pedology. Madison: **Soil Science Society of America**. p. 57-74, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub34.c4>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**, 2017.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. D. A.; MARENGO, J. A. **Nota técnica: elaboração dos mapas de índice de aridez e precipitação total acumulada para o Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. **Ecorregioes propostas para o Bioma caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste, Instituto de Conservação Ambiental. The Nature Conservancy do Brasil, 74(07), 2002.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

VERBIST, K.; SANTIBAÑEZ, F.; GABRIELS, D.; SOTO, G. **Atlas de zonas áridas de América Latina y El Caribe**. 25, 2010.

WILLIAMS, J. P.; VEPRASKAS, M. J. Solute movement through quartz-diorite saprolite containing quartz veins and biological macropores. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 23, n. 4, p. 810-815, 1994.

<https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300040028x>

APÊNDICE A – TESTE DE VARIAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE NEOSSOLO LITÓLICO, SOB DIFERENTES TRATAMENTOS DOS HORIZONTES DO SAPROLITO.

Propriedade	Fonte de variação			
	Cr1	¹ CV (%)	Cr2	CV (%)
<i>Física</i>				
² AT	17,23*	1,58	45,28*	1,94
³ AG	19,96*	3,13	65,93*	2,58
⁴ AF	2,18 ^{ns}	8,11	5,35*	4,09
⁵ SIL	10,06*	8,28	45,27*	9,44
⁶ ARG	2,62 ^{ns}	4,94	3,52 ^{ns}	3,79
⁷ ADA	0,34 ^{ns}	13,70	0,47 ^{ns}	9,63
⁸ GF	0,01 ^{ns}	29,83	0,15 ^{ns}	16,63
⁹ Ds	0,01 ^{ns}	2,47	0,01 ^{ns}	0,01
¹⁰ Dp	0,01 ^{ns}	0,01	7,01*	1,17
¹¹ PT	0,35 ^{ns}	11,01	2,70 ^{ns}	6,32
¹² S:A	2,37*	11,13	34,20*	9,45
<i>Química</i>				
¹³ pH _{H2O}	1,50 ^{ns}	1,25	31,01*	1,01
¹⁴ pH _{KCl}	10,50*	2,88	33,25*	1,57
¹⁵ ΔpH	11,3*	6,03	5,37*	3,95
¹⁶ Ca ²⁺	0,11 ^{ns}	14,27	0,53 ^{ns}	11,16
¹⁷ Mg ²⁺	0,17 ^{ns}	13,15	8,53 ^{ns}	5,97
¹⁸ K ⁺	10,34*	6,69	51,31*	3,85
¹⁹ Na ⁺	3,30 ^{ns}	8,63	0,40 ^{ns}	8,60
²⁰ SB	0,30 ^{ns}	9,53	14,58*	3,17
²¹ Al ³⁺	0,08 ^{ns}	26,93	6,64*	12,45
²² H+Al	0,07 ^{ns}	12,14	0,99 ^{ns}	5,61
²³ t	0,27 ^{ns}	9,32	15,57*	3,24
²⁴ T	0,14 ^{ns}	7,56	14,12*	3,43
²⁵ V	1,97 ^{ns}	2,61	7,65*	1,64
²⁶ PST	4,96 ^{ns}	7,86	1,41 ^{ns}	7,44
²⁷ m	0,18 ^{ns}	27,27	4,82 ^{ns}	10,49
²⁸ P	21,75*	13,05	76,36*	10,42
²⁹ COT	0,24 ^{ns}	4,31	2,30 ^{ns}	5,99
³⁰ MO	0,42 ^{ns}	4,21	2,70 ^{ns}	5,68

*Teste de Fisher a 5% de probabilidade estatística, ¹coeficiente de variação, ²areia total, ³areia grossa, ⁴areia fina, ⁵silte, ⁶argila total, ⁷argila dispersa em água, ⁸grau de floculação, ⁹densidade do solo, ¹⁰densidade de partículas, ¹¹porosidade total, ¹²relação silte:argila total, ¹³potencial hidrogeniônico em água, ¹⁴potencial hidrogeniônico em KCl, ¹⁵diferencial de potencial hidrogeniônico, ¹⁶cálcio trocável, ¹⁷magnésio trocável, ¹⁸potássio trocável, ¹⁹sódio trocável, ²⁰soma de bases, ²¹alumínio trocável, ²²acidez potencial, ²³capacidade de troca de cátions efetiva, ²⁴capacidade de troca de cátions potencial, ²⁵saturação por bases, ²⁶porcentagem de sódio trocável, ²⁷saturação por alumínio, ²⁸fósforo disponível, ²⁹carbono orgânico total e ³⁰matéria orgânica.

APÊNDICE B – TESTE DE VARIAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DE PLANOSSOLO HÁPLICO, SOB DIFERENTES TRATAMENTOS DOS HORIZONTES DO SAPROLITO.

Propriedade	Fonte de variação			
	Cr1	¹ CV (%)	Cr2	CV (%)
Física				
² AT	0,76 ^{ns}	1,92	0,25 ^{ns}	2,40
³ AG	0,13 ^{ns}	3,58	1,15 ^{ns}	4,01
⁴ AF	0,12 ^{ns}	7,03	6,69*	4,97
⁵ SIL	0,58 ^{ns}	6,19	0,33 ^{ns}	15,06
⁶ ARG	27,02*	1,12	0,07 ^{ns}	7,91
⁷ ADA	2,40 ^{ns}	9,11	0,79 ^{ns}	10,55
⁸ GF	3,74 ^{ns}	18,41	0,29 ^{ns}	36,09
⁹ Ds	0,01 ^{ns}	10,07	0,01 ^{ns}	0,01
¹⁰ Dp	4,01*	1,22	0,01 ^{ns}	0,01
¹¹ PT	0,03 ^{ns}	27,40	3,92 ^{ns}	3,69
¹² S:A	3,01 ^{ns}	7,87	0,38 ^{ns}	12,56
Química				
¹³ pH _{H2O}	0,67 ^{ns}	1,31	2,91 ^{ns}	2,01
¹⁴ pH _{KCl}	19,01*	0,76	1,01 ^{ns}	2,49
¹⁵ ΔpH	1,09 ^{ns}	6,03	1,23 ^{ns}	8,04
¹⁶ Ca ²⁺	2,79 ^{ns}	3,51	1,28 ^{ns}	10,76
¹⁷ Mg ²⁺	0,87 ^{ns}	7,96	0,13 ^{ns}	10,98
¹⁸ K ⁺	15,50*	2,19	4,85 ^{ns}	8,83
¹⁹ Na ⁺	14,29*	1,98	0,16 ^{ns}	15,49
²⁰ SB	1,76 ^{ns}	4,82	1,04 ^{ns}	5,72
²¹ Al ³⁺	0,33 ^{ns}	15,84	1,50 ^{ns}	31,43
²² H+Al	1,02 ^{ns}	15,86	0,33 ^{ns}	129,90
²³ t	1,74 ^{ns}	4,76	1,03 ^{ns}	5,79
²⁴ T	1,36 ^{ns}	5,01	0,73 ^{ns}	5,83
²⁵ V	2,02 ^{ns}	0,45	2,20 ^{ns}	0,65
²⁶ PST	0,46 ^{ns}	4,65	0,07 ^{ns}	13,28
²⁷ m	0,60 ^{ns}	21,52	1,50 ^{ns}	26,73
²⁸ P	7,39*	5,16	0,04 ^{ns}	12,59
²⁹ COT	0,90 ^{ns}	26,57	0,16 ^{ns}	125,78
³⁰ MO	0,74 ^{ns}	28,10	0,28 ^{ns}	131,47

*Teste de Fisher a 5% de probabilidade estatística, ¹coeficiente de variação, ²areia total, ³areia grossa, ⁴areia fina, ⁵silte, ⁶argila total, ⁷argila dispersa em água, ⁸grau de floculação, ⁹densidade do solo, ¹⁰densidade de partículas, ¹¹porosidade total, ¹²relação silte:argila total, ¹³potencial hidrogeniônico em água, ¹⁴potencial hidrogeniônico em KCl, ¹⁵diferencial de potencial hidrogeniônico, ¹⁶cálcio trocável, ¹⁷magnésio trocável, ¹⁸potássio trocável, ²⁹sódio trocável, ²⁰soma de bases, ²¹alumínio trocável, ²²acidez potencial, ²³capacidade de troca de cátions efetiva, ²⁴capacidade de troca de cátions potencial, ²⁵saturação por bases, ²⁶porcentagem de sódio trocável, ²⁷saturação por alumínio, ²⁸fósforo disponível, ²⁹carbono orgânico total e ³⁰matéria orgânica.

APÊNDICE C – TESTE DE VARIAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO LUVISSOLO CRÔMICO, SOB DIFERENTES TRATAMENTOS DOS HORIZONTES DO SAPROLITO.

Propriedade	Fonte de variação			
	Cr1	¹ CV (%)	Cr2	CV (%)
<i>Física</i>				
² AT	27,68*	2,20	20,23*	2,36
³ AG	17,76*	3,02	51,96*	2,69
⁴ AF	12,79*	3,21	6,09*	5,23
⁵ SIL	4,43 ^{ns}	7,56	4,65 ^{ns}	8,42
⁶ ARG	23,66*	2,13	3,66 ^{ns}	6,71
⁷ ADA	1,79 ^{ns}	5,02	1,20 ^{ns}	4,27
⁸ GF	5,56*	17,62	2,90	25,75
⁹ Ds	0,01 ^{ns}	0,01	0,01 ^{ns}	16,67
¹⁰ Dp	37,01*	1,28	1,01 ^{ns}	1,23
¹¹ PT	24,50*	2,57	0,03 ^{ns}	31,21
¹² S:A	0,60 ^{ns}	10,16	0,27 ^{ns}	15,08
<i>Química</i>				
¹³ pH _{H2O}	2,25 ^{ns}	1,55	2,11 ^{ns}	1,32
¹⁴ pH _{KCl}	37,01*	0,74	3,01 ^{ns}	1,27
¹⁵ ΔpH	2,29 ^{ns}	4,69	5,20*	3,46
¹⁶ Ca ²⁺	49,54*	2,28	2,40 ^{ns}	4,89
¹⁷ Mg ²⁺	18,38*	3,89	1,27 ^{ns}	5,69
¹⁸ K ⁺	349,01*	1,55	4,69 ^{ns}	9,01
¹⁹ Na ⁺	59,61*	2,90	0,28 ^{ns}	10,07
²⁰ SB	41,24*	2,56	2,45 ^{ns}	4,35
²¹ Al ³⁺	3,46 ^{ns}	53,01	3,16 ^{ns}	29,27
²² H+Al	0,82 ^{ns}	9,88	0,57 ^{ns}	27,15
²³ t	43,87*	2,50	2,49 ^{ns}	4,35
²⁴ T	38,64*	2,55	2,55 ^{ns}	4,39
²⁵ V	3,34 ^{ns}	0,34	0,35 ^{ns}	0,41
²⁶ PST	10,33*	3,06	0,11 ^{ns}	10,25
²⁷ m	3,25 ^{ns}	30,01	3,25 ^{ns}	30,01
²⁸ p	3,32 ^{ns}	17,29	3,32 ^{ns}	17,29
²⁹ COT	0,95 ^{ns}	17,94	3,95 ^{ns}	20,19
³⁰ MO	0,97 ^{ns}	18,83	4,25 ^{ns}	19,48

*Teste de Fisher a 5% de probabilidade estatística, ¹coeficiente de variação, ²areia total, ³areia grossa, ⁴areia fina, ⁵silte, ⁶argila total, ⁷argila dispersa em água, ⁸grau de floculação, ⁹densidade do solo, ¹⁰densidade de partículas, ¹¹porosidade total, ¹²relação silte:argila total, ¹³potencial hidrogeniônico em água, ¹⁴potencial hidrogeniônico em KCl, ¹⁵diferencial de potencial hidrogeniônico, ¹⁶cálcio trocável, ¹⁷magnésio trocável, ¹⁸potássio trocável, ¹⁹sódio trocável, ²⁰soma de bases, ²¹alumínio trocável, ²²acidez potencial, ²³capacidade de troca de cátions efetiva, ²⁴capacidade de troca de cátions potencial, ²⁵saturação por bases, ²⁶porcentagem de sódio trocável, ²⁷saturação por alumínio, ²⁸fósforo disponível, ²⁹carbono orgânico total e ³⁰matéria orgânica.