

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

**MATHEUS GASTÃO DE MATOS BATISTA**

**Graus de intemperismo em Vertissolos do Nordeste do Brasil**

**Weathering degrees of Vertisols in Northeastern Brazil**

São Paulo

2024

MATHEUS GASTÃO DE MATOS BATISTA

**Graus de intemperismo de Vertissolos do Nordeste do Brasil**

Trabalho de Graduação Individual (TGI)  
apresentado ao Departamento de Geografia  
da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências  
Humanas, da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando  
Nadal Junqueira Villela

Coorientadora: Profa. Dra. Sheila  
Aparecida Correia Furquim

São Paulo

2024

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

Catalogação na Publicação  
Serviço de Biblioteca e Documentação  
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

B333g                    Batista, Matheus  
                          Graus de intemperismo de Vertissolos do Nordeste  
                          do Brasil / Matheus Batista; orientador Fernando  
                          Villela - São Paulo, 2024.  
                          55 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual) – Faculdade  
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da  
Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia.

1. Vertissolos. 2. Índice de intemperismo CIA. 3.  
Perfil de intemperismo. I. Villela, Fernando, orient.  
II. Título.

**BATISTA, M. G. M. Graus de intemperismo de Vertissolos do Nordeste do Brasil.**  
Trabalho de Graduação Individual (TGI) apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras  
e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel  
em Geografia.

Aprovado em: 26 de julho de 2024.

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Fernando Nadal Junqueira Villela      Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Hermano Melo Queiroz      Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Antonio Carlos de Barros Correa      Instituição: Universidade Federal de  
Pernambuco

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

*“Graças ao amor...  
É mais belo acordar  
É mais suave o respirar  
É mais possível o sonhar”*

*- J. Wilton*

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho de conclusão de curso não seria possível sem o apoio e a contribuição de muitas pessoas, às quais sou imensamente grato(a).

Primeiramente, agradeço a Profa. Dra. Sheila Furquim, Prof. Dr. Fernando Villela e Prof. Dr. Marcos Pinheiro, por toda orientação, incentivo e pelo compartilhamento de conhecimento ao longo desta jornada acadêmica.

A minha avó Cremilda, mãe Silvia e a dona do meu amor Ivana, pelo amor, apoio incondicional e por acreditarem em mim em todos os momentos.

Ao meu grande amigo Nino, pela constante ajuda, companheirismo, inspiração e amizade.

Aos amigos Pedro, Clara, Paulo, J. Wilton, Larissa, Juliana, Ana Flávia, Gabriela Paixão e Ana Paula (mãe do Pedro) pela amizade e por estarem ao meu lado. A Cleuza, Benício e Antônio, por todo incentivo e carinho. A Ana (FEA) e Sheila Farias, pelo apoio.

Às professoras Tereza, Gemima, Patrícia Maria de Jesus, Patrícia Laczynski, Paula Juliasz, Eduardo Giroto, ao diretor Carlos e a minha psicóloga Jaqueline por todo ensinamento e inspiração ao longo dos anos.

Finalmente, agradeço à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, pela oportunidade de realização do curso e por proporcionar uma formação de excelência.

A todos(as), meu sincero muito obrigado!

## RESUMO

**BATISTA, M. G. M. Graus de intemperismo de Vertissolos do Nordeste do Brasil.**  
2024. 55 f. Trabalho de Graduação Individual (TGI) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Este trabalho tem como objetivo avaliar os graus de alteração dos Vertissolos localizados no Nordeste brasileiro sob clima semiárido, compreendendo as diferentes camadas e zonas que refletem os variados graus de intemperismo. Foram obtidos dados físicos e químicos de três amostras de Vertissolos, relacionando e sistematizando esses dados para interpretar os diferentes graus de alteração dos perfis de intemperismo. A pesquisa envolveu a caracterização de áreas de estudo no Nordeste, descrição geomorfológica e coleta de amostras de solo, seguido de ensaios laboratoriais para análise granulométrica, índice de intemperismo CIA e coeficiente linear de expansibilidade (COLE). No Perfil 1, o índice de intemperismo CIA variou de 68 no horizonte Ap até 22 no horizonte C. O COLE excedeu 0,09 nos horizontes superficiais e variou entre 0,03 e 0,06 em profundidades maiores. O Perfil 2, apresentou índices de intemperismo CIA de 81 a 70 nos horizontes superficiais, com valores mais baixos nas camadas mais profundas. O COLE no Perfil 2 também foi alto nos horizontes superiores, variando de 0,09 a 0,102, e menor nas camadas mais profundas. No Perfil 3, os índices de intemperismo CIA foram de 85 a 83 nos horizontes superiores, reduzindo para 17 no horizonte Cr/R. Em termos de granulometria, os perfis mostraram predominância de frações de argila nos horizontes superficiais, com variações de silte e areia ao longo dos perfis. Os resultados indicaram variações significativas no COLE e no índice de intemperismo entre os diferentes perfis. Perfis com maior presença da fração argila e argilominerais expansivos mostraram maior capacidade de expansão e contração, especialmente em horizontes mais próximos à superfície. A discussão dos dados relacionou essas variações com as características pedológicas, geomorfológicas e climáticas da região, destacando a influência do clima semiárido e do material parental nas propriedades dos solos. Conclui-se que os Vertissolos do Nordeste brasileiro apresentam uma complexa interação entre suas propriedades físicas e químicas.

**Palavras-chave:** Vertissolos. Índice de intemperismo CIA. Perfil de intemperismo.

## ABSTRACT

BATISTA, M. G. M. **Degrees of change in the weathering profile of Vertisols in Northeast Brazil.** 2024. 55 f. Individual Graduation Work (TGI) – Faculty of Philosophy, Letters and Human Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2024.

This work aims to evaluate the degrees of alteration of Vertisols located in the Brazilian Northeast under a semi-arid climate, comprising the different layers and zones that reflect the varying degrees of weathering. Physical and chemical data were obtained from three samples of Vertisols, relating and systematizing these data to interpret the different degrees of change in weathering profiles. The research involved the characterization of study areas in the Northeast, geomorphological description and collection of soil samples, followed by laboratory tests for granulometric analysis, CIA weathering index and linear coefficient of expansibility (COLE). In Profile 1, the CIA weathering index ranged from 68 in the Ap horizon to 22 in the C horizon. The COLE exceeded 0.09 in the superficial horizons and varied between 0.03 and 0.06 at greater depths. Profile 2 presented CIA weathering indices of 81 to 70 in the superficial horizons, with lower values in the deeper layers. The COLE in Profile 2 was also high in the upper horizons, ranging from 0.09 to 0.102, and lower in the deeper layers. In Profile 3, CIA weathering indices were 85 to 83 in the upper horizons, reducing to 17 in the Cr/R horizon. In terms of grain size, the profiles showed a predominance of clay fractions in the surface horizons, with variations in silt and sand along the profiles. The results indicated significant variations in the COLE and weathering index between the different profiles. Profiles with a greater presence of clay fraction and expansive clay minerals showed greater capacity for expansion and contraction, especially in horizons closer to the surface. The discussion of the data related these variations to the pedological, geomorphological and climatic characteristics of the region, highlighting the influence of the semi-arid climate and the parent material on the soil properties. It is concluded that Vertisols from the Brazilian Northeast present a complex interaction between their physical and chemical properties.

**Keywords:** Vertisols. CIA weathering indicator. Weathering profile.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1:	Mapa litológico do Perfil 1	24
Figura 2:	Mapa litológico do Perfil 2	25
Figura 3:	Mapa litológico do Perfil 3	26
Figura 4:	Relação COLE	31
Figura 5:	Descrição Perfil 1	36
Figura 6:	Descrição Perfil 2	36
Figura 7:	Descrição Perfil 3	36
Figura 8:	Paisagem associada ao Perfil 1	37
Figura 9:	Paisagem associada ao Perfil 2	37
Figura 10:	Paisagem associada ao Perfil 3	37

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1:	Resultado de CIA perfil 1	38
Gráfico 2:	Resultado de CIA perfil 2	38
Gráfico 3:	Resultado de CIA perfil 3	38
Gráfico 4:	Resultado de COLE perfil 1	40
Gráfico 5:	Resultado de COLE perfil 2	40
Gráfico 6:	Resultado de COLE perfil 3	40
Gráfico 7:	Resultado de granulometria perfil 1	41
Gráfico 8:	Resultado de granulometria perfil 2	41
Gráfico 9:	Resultado de granulometria perfil 3	41

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

USP	Universidade de São Paulo
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
CIA	<i>Chemical Index of Alteration</i>
COLE.	Coeficiente Linear de Expansibilidade
SiBICS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
UNIFESP	Universidade Federal de São Paulo
P1	Perfil 1
P2	Perfil 2
P3	Perfil 3

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 Gerais .....	16
2.2 Específicos .....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1 Solos e definições .....	16
3.2 Classificação do solo .....	19
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
4.1 Caracterização da área de estudo .....	21
4.2 Unidades geomorfológicas .....	27
4.3 Descrição e coleta em campo.....	28
4.4 Ensaios Laboratoriais.....	28
4.3.1 Análise Granulométrica .....	28
4.3.2 Índice de Intemperismo CIA.....	30
4.3.3 Coeficiente Linear de Expansibilidade .....	31
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>32</b>
5.1 Descrição morfológica.....	32
5.2 Índice de intemperismo CIA.....	37
5.3 COLE .....	39
5.4 Granulometria .....	40
<b>6. DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 - Vertissolos

A presente pesquisa insere-se em um projeto mais amplo, denominado “Mineralogia de Vertissolos Brasileiros: influência nas propriedades, gênese e classificação dos solos”, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo 2020/16446-1) e coordenado pela Profa. Dra. Sheila A. C. Furquim.

O entendimento do Vertissolo pode ser realizado desde a origem do seu nome, o radical “Verti” deriva de *vertere* em Latim, que significa inverter, que está relacionado às movimentações do solo e sua rotatividade interna, que propiciam inversão dos materiais (LIMA, 2014; FAO, 2015).

No Brasil, os solos predominantes são Latossolos, Argissolos e Neossolos, que estão distribuídos em aproximadamente 70% do território nacional. Já o Vertissolo ocupa, aproximadamente, 2% do território brasileiro, sendo predominante em regiões semiáridas do Nordeste, no Pantanal, em alguns pontos do Rio Grande do Sul (SANTOS *et al.*, 2018). Este solo pode ser encontrado em diversas localizações do globo como Austrália, China, Índia, Marrocos, Estados Unidos, Angola, dentre outros (SOIL SURVEY STAFF, 1999).

Trata-se de um solo com alta predominância de argila (35% ou mais), pouca variação entre os horizontes. O principal argilomineral é a esmectita (argilomineral 2:1), a qual possui altas taxas de expansibilidade e contração. Devido a isso, o Vertissolo possui altas concentrações de nutrientes e alta Capacidade de Troca de Cátions (CTC), com alta predominância de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (BARBOSA, 2017; SOIL SURVEY STAFF, 1999). A alta ocorrência de esmectitas também acarreta um comportamento físico específico, sendo um material extremamente duro quando seco e extremamente plástico e pegajoso quando úmido.

Um importante fator de formação em Vertissolos é o tipo do seu material parental, principalmente em relação à sua mineralogia e química (COULOMBE *et al.*, 1996). Acerca disso, é possível observar que os Vertissolos podem ser formados a partir de uma gama de rocha e materiais, incluindo rochas sedimentares, metamórficas, ígneas e depósitos aluviais e materiais inconsolidados. Esses tipos de materiais de origem podem ser tanto autóctones quanto alóctones (BARBOSA, 2017). Algumas rochas, principalmente as básicas, geram soluções com alta concentração de cátions de Mg e Si, que favorecem a formação *in situ* de argilominerais 2:1. Entretanto, os Vertissolos também podem herdar argilas de rochas sedimentares (BREEMEN; BUURMAN, 2002; COULOMBE *et al.*, 1996).

Além do material de origem, a influência do clima também é fundamental na formação destes solos. Áreas com déficit hídrico, ou seja, altas taxas de evapotranspiração e baixa taxa de precipitação, favorecem o surgimento das esmectitas na forma de precipitado. A oscilação no regime hídrico, caracterizada por períodos de alta e baixa precipitação também deve ser considerada, já que as esmectitas se contraem e expandem de acordo com a disponibilidade de água, formando as feições que caracterizam os Vertissolos, como fendas, slickensides, relevo gilgai, entre outras (BREEMEN; BUURMAN, 2002; BRIERLEY *et al.*, 2011; COULOMBE *et al.*, 1996; SOIL SURVEY STAFF, 1999).

Por fim, em relação ao relevo, este solo ocorre de forma preponderantemente em áreas planas ou suavemente onduladas. As feições topográficas são importantes para o escoamento e o controle da drenagem, de modo que ambientes com mais declives propiciam maiores graus de erosão, já em ambientes planos tende-se a um desenvolvimento maior e processos de lixiviação menos intensos, possibilitando o acúmulo de bases e sílica e a formação de esmectitas. A compreensão da paisagem é essencial para a identificação de vertissolos, sendo assim, em relação ao relevo, é comum localiza-los na base ou em pequenas depressões fechadas (BRIERLEY *et al.*, 2011; COULOMBE *et al.*, 1996).

O intemperismo ou meteorização, é um processo natural que abrange a decomposição química e fragmentação física das rochas expostas na superfície terrestre. Este fenômeno é resultado da interação complexa entre diversos agentes externos, tais como água, vento, variações de temperatura e atividades biológicas, incluindo organismos vivos. O intemperismo é fundamental para o processo de pedogênese, tendo em vista que o processo de formação do solo ocorre a partir de materiais desagregados e quimicamente alterados (BUOL *et al.*, 2011). Esse processo ocorre de maneira gradual e lenta ao longo de dezenas e centenas de milhares de anos, sendo parcialmente responsável pelo desenvolvimento do solo (EVANS; CAMERON, 1979;). É possível categorizar o intemperismo em dois tipos principais: o físico e o químico.

O intemperismo do tipo físico atua no processo de fragmentação e desagregação da rocha, não havendo alterações mineralógicas. Existem diversas formas para a ocorrência desse processo, como a oscilação entre temperatura altas e baixas, que causam a dilatação e contração de minerais; por abrasão de partículas transportadas por ação eólica; congelamento e descongelamento de água em fissuras; e até mesmo ação de organismos vivos, como raízes e túneis (BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011).

As alterações causadas pelo intemperismo químico ocorrem pela presença de agentes químicos no solo, como água, dióxido de carbono, oxigênio, ácidos orgânicos, entre outros. Estes compostos interagem na dissolução e alteração química dos minerais, através

principalmente de cinco reações químicas: hidrólise, oxidação-redução, carbonatação, hidratação e complexação (BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011).

Em regiões com clima árido, com baixa taxa de precipitação e alta de evapotranspiração, o intemperismo tende a afetar a rocha em menor grau, caracterizada por apresentar um grau inicial de alteração no embasamento rochoso. Este representa um grau muito baixo do intemperismo químico sob o manto de alteração (BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011).

Nos climas semiáridos e temperados, a fase de bissialitização se estabelece, permitindo que o intemperismo químico atinja maiores profundidades do que em regiões áridas. Este processo resulta na degradação da rocha subjacente, onde os minerais primários, como feldspatos e micas, sofrem hidrólise parcial. A hidrólise parcial envolve a reação de íons de hidrogênio ( $H^+$ ) presentes na água com os minerais primários, promovendo a decomposição desses minerais e liberando íons na solução. Por exemplo, o feldspato potássico pode ser transformado em caulinita, sílica em solução e íons potássio.

Durante a bissialitização, ocorre um acúmulo maior de sílica (Si) em comparação ao alumínio (Al), formando minerais argilosos do tipo 2:1. Esses minerais, especialmente as esmectitas, possuem uma estrutura cristalina com duas camadas tetraédricas de sílica por cada camada octaédrica de alumínio ou magnésio. Este ambiente de menor lixiviação favorece a formação e a estabilidade dos argilominerais 2:1. Assim, em climas semiáridos e temperados, a bissialitização promove a formação de esmectitas e outros minerais argilosos similares, contribuindo para a alteração e a evolução dos solos nessas regiões.

Sucedendo a bissialitização em termos de grau de intemperismo, a monossilatização também é um processo químico resultante de hidrólise parcial. Essa reação ocorre em solos encontrados em regiões de clima tropical e subtropical. Possibilita a formação de solos com grandes profundidades, resultando em alterações significativas nos minerais primários. O principal produto mineralógico é representado pelos argilominerais 1:1, como a caulinita (BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011).

Por fim, em ambientes equatoriais, um processo de intemperismo químico distintivo é a alitização, especialmente em regiões de floresta. Devido à elevada pluviosidade e temperatura, a taxa de evapotranspiração permanece abaixo da pluviosidade, o que propicia um balanço hídrico positivo. Durante este processo de hidrólise total, a dissociação da molécula de água ( $H_2O$ ) produz íons  $H^+$  e  $OH^-$ , os quais se combinam com moléculas de  $CO_2$  para formar ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ). Como resultado, o ambiente se torna acidificado, promovendo a reação com os minerais de feldspato, os quais se rearranjam para formar minerais óxidos de Fe e Al. Outros elementos, tais como silicato, alumínio, potássio, sódio e outros, são lixiviados em

solução. Consequentemente, nestes ambientes, os solos tendem a desenvolver-se de maneira mais profunda (BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011).

## 1.2 Perfil de Intemperismo

Há na bibliografia muitas definições para a classificação das diferentes porções do perfil de alteração. Não existem na bibliografia definições conclusivas e fechadas acerca do que é constituído o perfil de intemperismo. Mas, basicamente, esse corpo é definido como a porção da rocha que sofreu alteração, que seria composto por elementos acima do substrato rochoso, ou seja, tanto o solo quanto por sedimentos e rocha quimicamente intemperizadas (SANTOS, 2015).

Por exemplo, segundo Velde e Meunier (2008), o horizonte C é definido apenas como uma porção entre o horizonte B e o saprolito. Por sua vez, para Santos et.al. (2015), o horizonte C é composto pelo saprolito e outros materiais, o que se aproxima das definições de White (2006).

Para Velde e Meunier (2008), o *Saprolit* corresponde a uma porção de material inconsolidado que não conserva a estrutura original da rocha, sendo friável e com baixa resistência mecânica. Já o *Saprock* é a porção no qual se localiza a estrutura conservada da rocha, mas sua resistência mecânica é reduzida, portanto friável, devido a alteração de minerais primários; apresenta porosidade entre 10% a 20%. White (2006) interpreta o horizonte C como o local onde coexiste saprolito, sedimentos não consolidados e mineralogia alterada por processos de intemperismo. Para Juilleret *et al.* (2016), o *Regolith* é um horizonte com material inconsolidado, que passou por processos de intemperismo químico e ligeira cimentação, razoavelmente friável e que pode possuir estrutura estratigráfica, tendo em vista a deposição dos materiais. Ainda segundo Juilleret *et al.* (2016), o *Saprolite* retém estruturas da rocha matriz, o material é menos friável que o *Regolith*, mas ainda sim friável, sofrendo pouca alteração por intemperismo químico e processos pedogenéticos.

Do ponto de vista pedogenético, adotando Santos *et al.* (2015), o horizonte C conserva a estrutura da rocha original, contudo, é friável e com um grau moderado de intemperismo, não possui resistência e está abaixo do horizonte B. Já o horizonte C/Cr é aquele que possui elementos de C e Cr, tendo em vista que o Cr possui material pouco ou moderadamente intemperizado, sendo menos friável que o C e mantendo as características morfológicas da rocha subjacente. Assim, nessa abordagem da ciência do solo, em que o material intemperizado é chamado de C e suas variações, o perfil de alteração integra o solo.

Essas comparações evidenciam que um mesmo conjunto de dados ou informações pode ser interpretado de maneiras diversas. O que um autor determina como "C" pode ser considerado "regolito" por outro e "saprolito" por um terceiro. Essa amplitude de resultados e interpretações divergentes pode levar o pesquisador a buscar rótulos para as definições de seus objetos de análise, muitas vezes resultando em definições vagas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Gerais**

Avaliar os graus de intemperismo de Vertissolos localizados no Nordeste brasileiro, sob clima semiárido, compreendendo as diferentes camadas e/ou zonas que refletem os diferentes graus do intemperismo de solos derivados de três litologias diferentes.

### **2.2 Específicos**

- Compreender as características morfológicas e físicas (granulometria e COLE) de três diferentes perfis de Vertissolos;
- Calcular e compreender os diferentes graus de intemperismo nos perfis. Através de dados químicos de solos totais;
- Correlacionar os dados morfológicos e físicos com os graus de intemperismo.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Solos e definições**

O solo é uma porção importante que encobre grande parte da superfície terrestre, localizado entre a litosfera e atmosfera, sendo este um corpo tridimensional composto por: (1) seres vivos, que podem ser divididos em Microfauna, Mesofauna e Macrofauna; são importantes atores na estrutura do solo, na decomposição de matéria orgânica, ciclagem e fixação de nutrientes (CORREIA; OLIVEIRA, 2000); (2) matéria orgânica decomposta, que influencia na fertilidade do solo, na capacidade de troca de cátions, no controle do pH e fornecimento de nutrientes; (3) minerais, porção sólida inorgânica oriunda da decomposição de rochas, a textura dos solos é definida a partir da proporção argila, silte e areia contido no corpo; (4) água, que é a fase líquida contendo sais e íons dissolvidos; (5) ar, predominantemente composta por gases como oxigênio ( $O_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Essas frações relacionam-se de forma dinâmica, que consiste em constante interação e transformação. Os solos desempenham diversas funções vitais para a vida em superfície, incluindo o suporte para o crescimento de plantas, a capacidade de armazenar água, a função de estocagem de dióxido de

carbono ( $\text{CO}_2$ ) e reciclagem de compostos orgânicos (BUOL *et al.*, 2011; FAO, 2015; GUERRA, 1980; MEURER, 2017; SOIL SURVEY STAF, 2010).

A respeito da formação (pedogênese) desse complexo corpo, a ciência do solo (pedologia) interpreta que ocorre por meio dos quatro processos: adição de matéria e energia, perda de matéria e energia, translocação de matéria e energia e transformação de matéria. Os processos pedogenéticos incluem os de intemperismo, sendo estes últimos referentes à transformação de matéria. O solo começaria a se desenvolver a partir de um determinado substrato rochoso pela decomposição e alteração dos materiais de origem, formando horizontes de alteração. Uma das definições mais clássicas dos fatores de formação do solo é de Jenny (1994), que simplificou a formação dos solos na seguinte equação:  $s = f(m,t,v,c,o,r)$ . Segundo essa equação, os solos (s) são formados a partir da associação e ação e transformação conjunta do material de origem (m), tempo (t), vegetação (v), relevo (r) e organismo (o) (JENNY, 1994).

Embora esta pesquisa conceitua o solo segundo concepções pedológicas, é importante ressaltar que outras ciências o definem de outras maneiras. Por exemplo, para a geologia, como se pode ver em Velde e Meunier (2008), a ação do intemperismo nas rochas, sobretudo o do tipo químico, altera-as sem necessariamente implicar na formação do solo, tendo em vista que esse processo já ocorria antes do surgimento da vida na terra. Por outro lado, os processos pedogenéticos podem ocorrer em diversas situações, desde que nesse corpo atuem atividades biológicas (microrganismo, fauna, flora e etc). Desse modo, segundo Velde e Meunier (2008), o intemperismo e os processos pedogenéticos não atuam de forma concomitante, mas sim de forma independente, formando dois sistemas abertos que atuariam trocando componentes químicos e minerais. No decorrer do processo de formação e desenvolvimento desse corpo, o solo tende a apresentar um gradiente de formação horizontal, que por sua vez pode conter até os cinco seguintes horizontes (BUOL *et al.*, 2011; FAO, 2015; SANTOS *et al.*, 2018; SOIL SURVEY STAF, 2010 VELDE; MEUNIER, 2008;):

Quando presente, o horizonte O se localiza na porção superficial do solo. Este horizonte é considerado de natureza orgânica (> 8% de C orgânico), portanto possui grande concentração de húmus e material orgânico advindo dos seres vivos da superfície, apresentando coloração escura. É essencial para a manutenção da fertilidade e proteção do solo contra erosão. Em alguns casos, esse horizonte pode ter sido removido por ação antrópica ou natural, ou, devido à escassez de material orgânico, pode não se desenvolver.

O horizonte A é um horizonte superficial constituído principalmente por minerais (< 8% de C orgânico), porém possui maior concentração de matéria orgânica que os horizontes subjacentes, apresentando coloração mais escura do que o horizonte B. Este é um horizonte

com alta atividade biológica, como microrganismos, raízes, animais e outros. Os minerais de argila presentes nesse horizonte interagem com a matéria orgânica e com as raízes, o que impacta na capacidade produtiva do solo.

Quando presente, o E é um horizonte mineral subsuperficial caracterizado pela máxima remoção ou translocação de partículas finas, como argilominerais e óxidos, que são lixiviados para o horizonte inferior, geralmente o B.

Já o horizonte B é um horizonte mineral com concentração de determinados componentes, como argilominerais e óxidos de ferro, que podem tanto advirem do horizonte A ou E (por processos de lixiviação), quanto do horizonte C. É o horizonte de máximo desenvolvimento do solo, geralmente dando nome no primeiro nível categórico da classificação pedológica. As definições acerca do horizonte C variam de acordo com diferentes bibliografias, como exposto na introdução deste trabalho. Este é um horizonte distinto por ser pouco intemperizado e o ambiente de transição entre a rocha matriz e o solo. Se por um lado esse horizonte pode ser definido apenas por estar abaixo do B e acima do saprolito (VELDE; MEUINER, 2008), no campo da pedologia é definido pela presença de material pouco degradado, em sua maioria oriundos do embasamento rochoso (SANTOS *et al.*, 2018). Segundo Santos *et al.* (2018), é nessa camada que se encontra o saprolito.

Em uma análise morfológica do solo, avaliam-se propriedades observáveis do solo, sendo as principais características textura, cor, consistência, estrutura, nódulos e fendilhamento (SANTOS *et al.*, 2018).

A textura é um atributo físico do solo, que diz respeito à proporção da presença de areia, silte e argila na composição do solo. No laboratório, um experimento comumente realizado é a análise granulométrica, que permite determinar a proporção de areia, silte e argila presentes no solo. A partir desses dados, é possível utilizar a textura do solo para classificá-lo, como arenoso, arenoso-argiloso, franco-arenoso, franco, franco-siltoso, siltoso, franco-argilo-arenoso, franco-argiloso, franco-argilo-siltoso, argilo-arenoso, argilo-siltoso e argiloso (SANTOS *et al.*, 2018).

A cor é outro atributo físico empregado na análise de um perfil de solo. A cor pode auxiliar na compreensão da composição do solo, tendo em vista que essa cor varia de acordo com a presença de minerais e seu grau de oxidação e a presença de matéria orgânica. Para isso, utiliza-se a tabela de cores Munsell, que contém a sistematização das cores em matiz, valor e croma (SANTOS *et al.*, 2018).

A consistência é uma propriedade que diz respeito à coesão e aderência das partículas do solo, essa característica está relacionada às classes texturais do solo e varia de acordo com o grau de umidade (SANTOS *et al.*, 2018).

A estrutura do solo diz respeito à forma na qual os agregados, que são formados dos elementos texturais e minerais, arranja-se geometricamente no perfil; é definida a partir do seu tipo, tamanho e grau de desenvolvimento (SANTOS *et al.*, 2018).

Os nódulos e concreções podem ser encontrados ao longo de todo o horizonte; se dão pela concentração e agregação de minerais e agregados (SANTOS *et al.*, 2018).

O fendilhamento está relacionado à presença de fendas e rachaduras no decorrer do perfil. Costuma ocorrer com a variação de umidade e a contração e expansão das argilas expansivas 2:1, é comum a ocorrência em Vertissolos (SANTOS *et al.*, 2018).

### **3.2 Classificação do solo**

Com o intuito de buscar uma melhor compreensão e organizar o conhecimento científico sobre os solos, criou-se níveis para a classificação dos solos baseados nos seus diferentes atributos e características.

Dentre os principais atributos diagnósticos do solo presentes no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), cabe o destaque para os seguintes, que são relevantes para a pesquisa em Vertissolos (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Caráter Vértico**

Identifica-se como caráter vértico quando há a presença de fendas, estruturas cuneiformes ou slickenside presentes no horizonte. (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Caráter Ebânico**

Este caráter está associado à coloração do solo, sobretudo em solos que possuem cores escuras em horizontes diagnósticos subsuperficiais (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Contato Lítico**

É sobre a interação entre o solo e a rocha. Isto ocorre com um material de extrema dureza e resistência. Esse contato se dá em uma camada de transição ou intermediária (R/Cr ou RCr) em relação à rocha (R) não alterada (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Contato Lítico fragmentário**

É similar ao contato lítico, contudo, não se manifesta como um horizonte homogêneo, mas sim de forma fragmentada (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Grupamento textural**

Esse atributo é relativo à classe textural na qual o horizonte pertence, podendo ser arenosa, média, argilosa, muito argiloso ou siltosa. Os Vertissolos costumam possuir textura argilosa e muito argilosa (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Gilgai**

Esse é um atributo comum em Vertissolos, por serem solos argilosos ou altamente argilosos, especialmente por conta das esmectitas. São micro-relevos formados na superfície do solo, criando pequenas elevações semelhantes a morros. Essa feição está associada a fase de expansão das argilas ocorrendo durante estações úmidas, ocorrendo em conjunto com a compressão entre as superfícies de slickensides (SANTOS *et al.*, 2018).

➤ **Slickenside**

São as superfícies de fricção, apresentam brilho considerável, o que os destaca do restante do solo. O *slickenside* é formado a partir de variações entre momentos úmidos e secos, que propiciam a expansão e contração de argilas. Este atributo é determinante para identificação de Vertissolos (SANTOS *et al.*, 2018).

Na classificação de horizontes diagnósticos superficiais, o horizonte A também pode ser classificado como: Antrópico, horizonte em que houve a intervenção humana, seja na remoção ou revolvimento do solo; Chernozêmico, possui cor escura, espesso e com alta saturação por bases; Húmico, também com coloração escura, contudo, apresenta saturação por bases inferior ao Chernozêmico; proeminente, se difere do Chernozêmico por ter uma menor saturação por bases, e do húmico pela diferença do teor de carbono; Fraco, possui baixo desenvolvimento, é espesso, estrutura fraca e baixo teor de carbono orgânico; Moderado, são classificados como moderado os horizontes A que não se enquadram nas outras classificações. (SANTOS *et al.*, 2018).

Quanto aos horizontes diagnósticos subsuperficiais, destaca-se o Vértico, identificado como um horizonte com alto teor de argilas expansíveis, que atribui ao horizonte um alto valor de coeficiente de expansibilidade (COLE). Sendo assim, possui textura argilosa a muito argilosa. É comum encontrar superfícies de fricção (*slickensides*) e fendas, o que pode ser atribuído a expansão e contração das argilas (SANTOS *et al.*, 2018). A identificação de um horizonte vértico é pré-requisito para a classificação de Vertissolos.

A depender das características bem como horizontes dos diagnósticos, o SiBCS classifica os solos em diferentes classes hierárquicas divididas em seis categorias: ordem, subordem, grande grupo, subgrupo, família e série (SANTOS *et al.*, 2018).

O primeiro nível - ordem - agrupa os solos do Brasil em 13 tipos, são eles: Latossolo, Nitossolo, Argissolo, Planossolo, Plintossolo, Luvissolo, Chernossolo, Espodossolo, Vertissolo, Cambissolos, Neosolo, Gleissolo e Organossolo (SANTOS *et al.*, 2018).

Já na hierarquia de subordem em Vertissolos, o SiBCS identifica três tipos: Hidromórficos, trata-se de um tipo de Vertissolo que possuí horizonte acinzentado e horizonte

com até 100 cm de profundidade; Ebânico, horizontes B ou C que possuem esse caráter podem ocorrer em até 100 cm de profundidade e apresentam coloração escura; Háplico, são Vertissolos que não são Ebânicos e nem Hidromórficos (SANTOS *et al.*, 2018).

Na categoria de grandes grupos, a classe de interesse na pesquisa é o Órtico, que está presente nos três perfis analisados. Os solos definidos como Órticos são aqueles que não se classificam em outras classes de grandes grupos, como carbonáticos, sódicos e sálicos (SANTOS *et al.*, 2018).

Por fim, nos subgrupos, cabe o destaque para duas classes: Típicos, que são solo que não são salinos; Saprolítico, que são aqueles que possuem um horizonte C espesso (SANTOS *et al.*, 2018).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área de estudo**

Foram selecionados três perfis de solo para o presente trabalho. O Perfil 1 (P1), coordenadas geográficas 08° 29'52.3" S e 36° 14'23.9" W, encontra-se geograficamente situado no município de Cachoeirinha, localizado no estado de Pernambuco, classificado, segundo SiBCS (SANTOS *et al.*, 2018) como Vertissolo Ebânico Órtico Saprolítico, já segundo a nomenclatura adotada por IUSS Working Group WRB (2022) como *Pellic Vertisol*. Este perfil está contido sob contexto geológico de um corpo sianítico, também possuindo porções de granitos shoshoníticos. Essas formações teriam origem Neoproterozoicas.

Conforme Almeida e Ulbrich (1996), os shoshonitos são rochas relativamente ricas em Mg, Ca e K. Sua origem está associada às suítes monzoníticas, que por sua vez estão relacionadas a dioritos, mozonitos e sienitos, estando relacionadas com suítes cálcio-alcalinas.

A unidade geomorfológica é o Planalto da Borborema, estando o perfil localizado na altitude de 550 metros na posição de baixa vertente. A topografia característica desse ponto é observada como uma área de relevo planificado, com inclinação local que se mantém menor que 3%. É uma área moderadamente pedregosa a pedregosa, com afloramentos de veios de quartzo em uma distância aproximada de 150 metros do perfil descrito. No entanto, a classificação do local do perfil não se enquadra como um ambiente rochoso.

Quanto ao uso do solo, destaca-se a prática agrícola voltada para o cultivo de milho. No que diz respeito à hidrografia, o perfil está localizado no terço superior da bacia do Rio Uma.

Em relação às características climáticas, a área em questão é marcada por um clima semiárido, estando localizada dentro do Polígono da Seca, o qual se destaca pela escassez hídrica e balanço hídrico negativo (BELTRÃO *et al.*, 2005). Com uma precipitação anual de

609.0 mm e uma evapotranspiração potencial de 1830.2 mm, essa região é predominantemente coberta pela vegetação do tipo Caatinga Hipoxerófila.

Já o Perfil 2 (P2), coordenadas geográficas  $06^{\circ} 44' 2.5''$  S e  $38^{\circ} 15' 0.2''$  W, está localizado no município de Sousa, Paraíba, classificado, segundo SiBCS (SANTOS et.al., 2018), como Vertissolo Háplico Órtico Típico, já segundo IUSS Working Group WRB (2022), a nomenclatura deste solo é *Vertisol*. O perfil foi identificado sob a Formação Sousa, uma litologia que apresenta siltitos e folhelhos, possuindo intercalações de arenitos calcíferos, margas e calcário. Essa Formação possui origem no período Mesozóico/Cretáceo

Este perfil está situado na unidade geomorfológica da Depressão Sertaneja, a uma altitude de 223 metros. Localizado na baixa vertente, caracteriza-se por uma declividade de 0-2%, indicando um terreno predominantemente plano (<3%). Apresenta uma superfície pedregosa (7 a 15%) com seixos rolados de quartzo, embora não seja rochoso.

Durante a pesquisa de campo, foi observado que o solo é predominantemente utilizado para a criação de pastagens de bovinos. Quanto aos aspectos hidrográficos, a trincheira do P2 foi construída no trecho médio da bacia, próximo ao Rio Piranhas, que é um afluente da bacia hidrográfica do Rio do Peixe (BELTRÃO et al., 2005a).

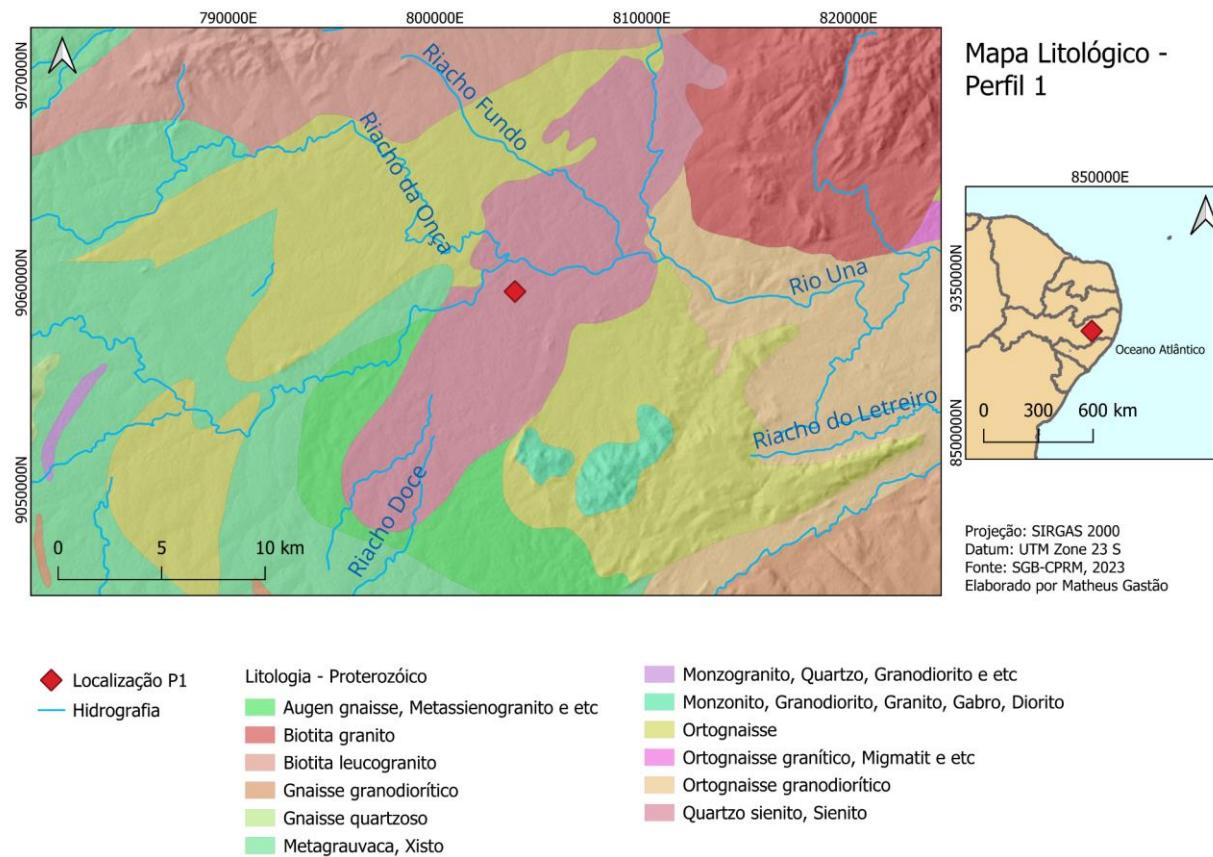
O clima predominante da área é semiárido, com pluviosidade anual de 1050.2 mm e evapotranspiração de 2589.0 mm. A vegetação primária predominante é do tipo caatinga hiperxerófila de várzea, com predomínio de espécies vegetais como marizeiro, carnaúba, tuico, caibeira e favela.

Por fim, o Perfil 3 (P3), coordenadas geográficas  $05^{\circ} 19' 35.3''$  S e  $37^{\circ} 34' 37.3''$  W, está localizado em Governador Dix Sept Rosado (RN) classificado, segundo SiBCS (SANTOS et al., 2018), como Vertissolo Háplico Órtico típico, também possuindo classificação como *Vertisol* (IUSS Working Group WRB, 2022). Possui como embasamento a Formação Jandaíra, sendo predominante a presença de biomicrito e calcário. Sua origem está associada aos períodos Mesozóico e Cretáceo

Este perfil está situado na unidade geomorfológica da Chapada do Apodi, a uma altitude de 59 metros. A topografia é predominantemente plana (<3%), localizando-se no segmento inferior de uma média vertente. O solo não apresenta uma superfície pedregosa, porém é levemente rochoso, com a presença de afloramentos de veios de quartzo.

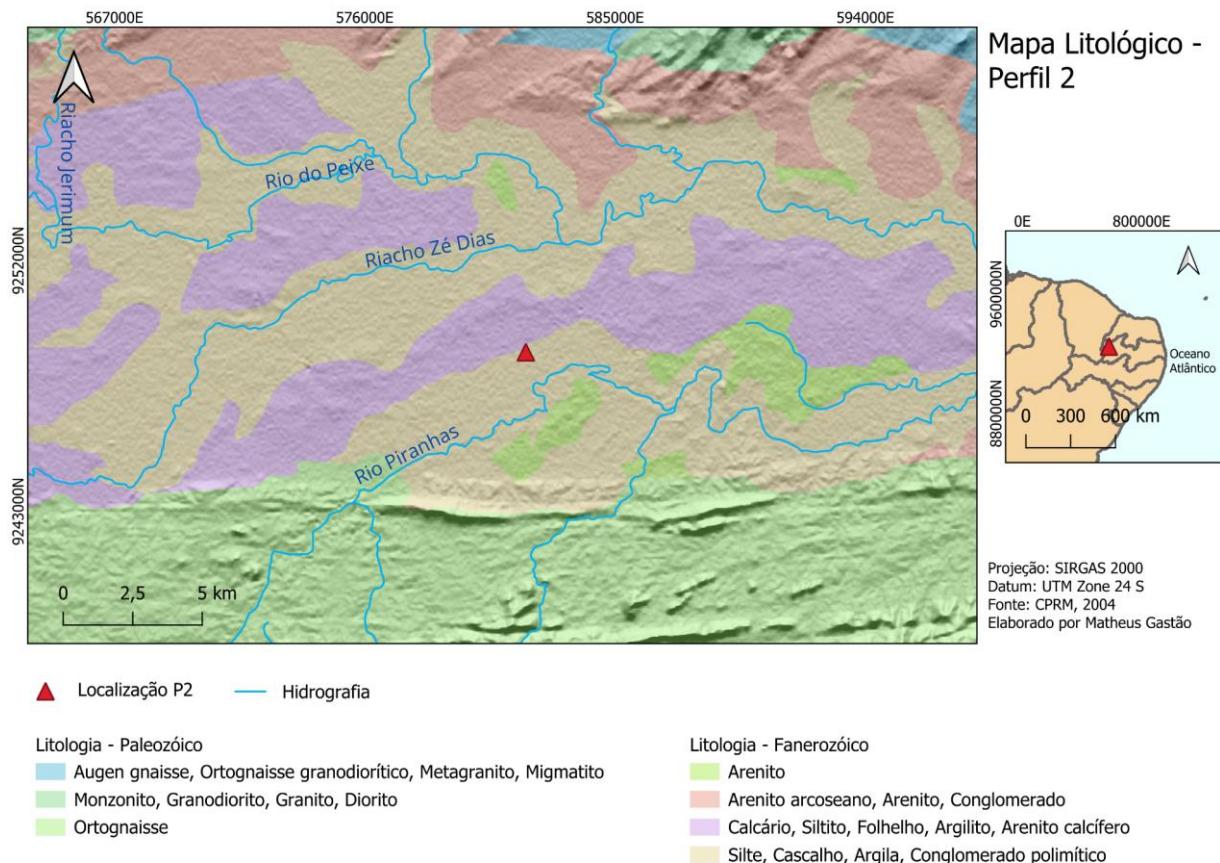
Este perfil também está situado no Polígono da Seca (BELTRÃO et al., 2005b), caracterizado por uma média pluviométrica anual de 835.4 mm e uma evapotranspiração potencial de 2251.0 mm. A vegetação predominante é uma caatinga hiperxerófila, mas nas proximidades do ponto de observação é possível notar áreas preparadas para o plantio. O perfil

foi identificado no terço médio da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró, que apresenta uma rede de drenagem limitada, destacando-se o Rio Apodi (BELTRÃO *et al.*, 2005b).



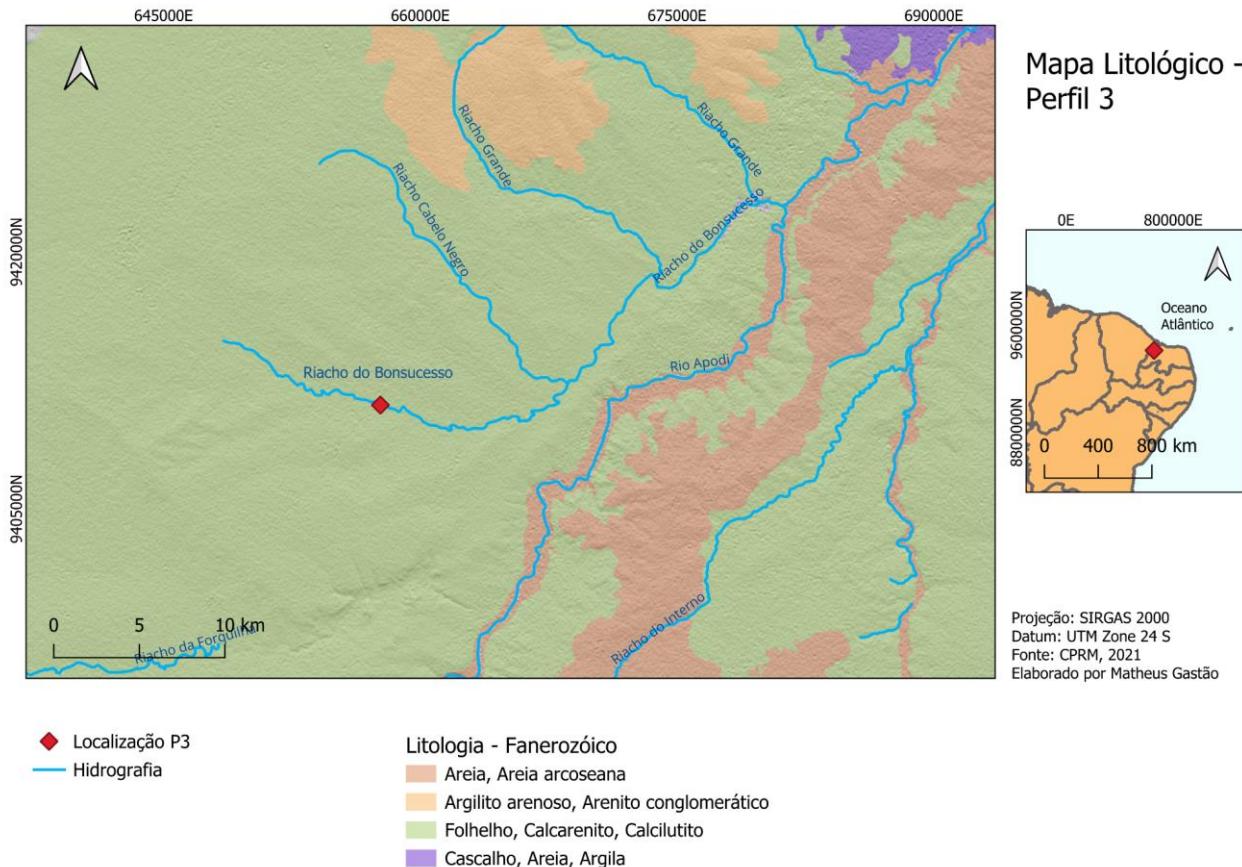
**Figura 1:** Mapa litológico Perfil 1

**Fonte:** Próprio autor.



**Figura 2:** Mapa litológico Perfil 2

**Fonte:** Próprio autor.



**Figura 3:** Mapa litológico Perfil 3

**Fonte:** Próprio autor.

## 4.2 Unidades geomorfológicas

O Planalto da Borborema, onde está localizado o P1, abrange os estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, com altitudes variando de 200 a 1190 metros em áreas mais elevadas. Sua formação está associada a movimentações tectônicas ocorridas no cenozóico e à separação de Gondwana. O embasamento dessa região é constituído por um escudo cristalino que compreende rochas pré-cambrianas (CORRÊA *et al.*, 2010; AB'SABER, 1953; CLAUDINO-SALES *et al.*, 2022).

Segundo Corrêa *et al.* (2010), o Planalto da Borborema apresenta determinadas porções esculpidas e rebaixadas por processos de pediplanação, que são mais comuns em regiões de climas semiáridos. Os autores também enfatizam a importância do intemperismo na formação de pediplanos e no recuo das vertentes (CORRÊA *et al.*, 2010). É relevante observar que a pediplanação, por si só, não é suficiente para explicar os processos de aplainamento nessa região (CORRÊA *et al.*, 2010; CLAUDINO-SALES *et al.*, 2022; MAIA; BEZERRA, 2012).

Além disso, a presença de morros residuais e inselbergs pode indicar processos de etchplanação. Esta hipótese vem a partir de indícios da ausência de estruturas pedológicas antigas e a presença de solos imaturos (CORRÊA *et al.*, 2010). Esses indícios sugerem um intenso processo de intemperismo ocorrido no cenozóico superior, resultando na formação de superfícies aplainadas. A observação de inselbergs ocorre em locais com litologias que apresentam rochas mais resistentes aos processos de intemperismo, o que sugere a existência prévia de outras superfícies formadas por rochas menos resistentes, corroborando com a proposta de Büdel (1982) sobre o processo de etchplanação. (CORRÊA *et al.*, 2010).

A outra unidade geomorfológica, correspondente ao Perfil 2 e Perfil 3, é a Depressão Sertaneja do São Francisco, que ocorre nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. Grande parte de sua extensão está localizada sobre rochas cristalinas.

Segundo Ab'Saber (1969), o aplainamento desta região ocorreu por meio de processos de pediplanação. Trata-se de um relevo caracterizado por intensos processos de erosão causados pela água e pelo vento. Historicamente a sua formação está associada à bacia sedimentar do São Francisco, bem como a atividades tectônicas pré-cambrianas, que também influenciaram a formação do Planalto da Borborema a partir de processos erosivos (OLIVEIRA, 2016; AB'SABER, 1969; MAIA; BEZERRA; CLAUDINO-SALES *et al.*, 2010).

### **4.3 Descrição e coleta em campo**

Os três perfis de Vertissolos foram selecionados devido a suas condições climáticas semiáridas semelhantes e os diferentes materiais de origem de cada perfil. Cabe o destaque de que o autor não estava presente nesta etapa do processo. Após a coleta, foi realizado o tratamento das amostras e sua destinação para os ensaios e análises em laboratório.

Os métodos e as descrições de Schoeneberger *et al.* (2012) e Santos (2015) foram empregados para a descrição de campo dos perfis. A cor das amostras secas e úmidas foi determinada com base em *Munsell Color*. A classificação dos Vertissolos seguiu o IUSS Working Group WRB (2022) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS, 2018).

### **4.4 Ensaios Laboratoriais**

Após a análise de campo, coleta e identificação, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório Multidisciplinar em Mineralogia, Águas e Solos (LAMAS) da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). Os materiais coletados passaram por secagem ao ar, sendo posteriormente esboroados com almofariz e pistilo de cerâmica, peneirados em peneira de 2mm, quarteados e separados em alíquotas destinadas à realização de outras análises no âmbito do projeto FAPESP.

Para o Laboratório de Pedologia (Laboped) da Universidade de São Paulo, foram destinadas amostras para a realização de ensaios laboratoriais, incluindo análise granulométrica e COLE (Coeficiente de Expansão Linear).

#### **4.3.1 Análise Granulométrica**

Antes da realização das análises granulométricas foi preciso remover os carbonatos do solo. Ao realizar o teste das amostras aplicando-se gotas de HCl 10%, notou-se uma forte reação, o que é um indício da presença de carbonatos. A eliminação dos carbonatos é necessária pois, quando em contato com os agentes dispersores, as bases tendem a formar aglomerados, o que dificulta a dispersão das partículas de argila (TEIXEIRA, 2017). Nessa primeira etapa, as amostras foram tratadas com uma solução de HCl a 0,5M, sendo adicionado 50 ml em 50g de amostras até que não fossem observadas reações (TEIXEIRA, 2017).

A segunda etapa consistiu na lavagem da amostra, para retirar o HCl, e remoção de sais. Para isso, a amostra foi inserida em papel filtro e lavada com Álcool Etílico P.A. Após algumas séries da lavagem, uma pequena alíquota do produto da lavagem é testada com Nitrato de Prata. A formação de precipitado branco indica a presença de sais, dessa forma, seguiu-se a lavagem, do contrário, a amostra estava pronta para o início da etapa de dispersão.

Utilizando a amostra previamente seca ao ar, livre de carbonatos e sais, analisou-se elementos da textura do solo, ou seja, as quantidades de argila, silte e areia. Esta análise foi realizada por meio da peneiragem do solo esborrado, dispersão mecânica por sedimentação com auxílio de agentes dispersantes químicos e pesagem das diversas frações obtidas (TEIXEIRA, 2017).

A análise granulométrica avalia a variação textural nos horizontes dos solos, mais especificamente das frações areia muito grossa (2 mm a 1 mm), areia grossa (1 mm a 0,50mm), areia média (0,50 mm a 0,25 mm), areia fina (0,25 mm a 0,1 mm), areia muito fina (0,1 mm a 0,056 mm), silte (0,056 mm a 0,002 mm), argila grossa (0,002mm a 0,0002 mm) e argila fina (0,0002 mm) (SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017).

Para realizar a dispersão das partículas, foi adicionado em garrafa de Stohmann 20 g de amostra, 100 ml do agente dispersante (solução de Hexametafosfato de sódio) e 25g de esfera de vidro. Esse sistema foi colocado sob agitação por 12 horas. Após esse período, o conteúdo da garrafa foi adicionado a uma proveta de 1 litro e completado com água destilada até 970 ml. Após o tempo determinado de sedimentação das frações silte, argila total e argila fina, de acordo com a Lei de Stokes, as partículas foram coletadas com auxílio de uma pipeta graduada de 10 ml. Essas amostras foram distribuídas em bêqueres e pesadas.

Para finalizar essa etapa, realizamos a análise de areia total a partir de peneiramento para, enfim, calcular as porcentagens das frações que compõem este solo.

Para determinar o tempo de sedimentação das partículas, foram realizados cálculos a partir da equação de Stokes:

$$v = \frac{r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{9\eta}$$

$$t = \frac{h}{v}$$

Onde:

v = velocidade de queda (m/s);

h = distância de queda da partícula;

t = tempo de queda;

r<sup>2</sup> = raio da partícula;

g = aceleração da gravidade;

ρ<sub>p</sub> = densidade da partícula;

ρ<sub>f</sub> = densidade do fluído;

n = viscosidade do fluido.

#### 4.3.2 Índice de Intemperismo CIA

O índice de intemperismo CIA (*Chemical Index of Alteration*) é uma medida que quantifica o grau de intemperismo químico da rocha e solo, calculado com base na relação das concentrações de elementos químicos, como alumínio, potássio e sódio. Este índice é uma ferramenta valiosa para compreender o nível de intemperismo e o grau de desenvolvimento de solos. Além disso, pode fornecer informações sobre as condições ambientais passadas em que as rochas se formaram (NESBITT; YOUNG, 1982).

O alumínio, por conta da alta eletropositividade, tende a formar complexos com íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), formando hidróxido de alumínio  $\text{Al(OH)}_3$ , que por sua vez possui baixa solubilidade e alta capacidade de adsorção em partículas e sedimentos, o que diminui a sua mobilidade no solo. Desse modo, o alumínio é utilizado como um indicador do processo de intemperismo químico, tendo em vista que sua ausência ou presença podem indicar a taxa e o grau de intemperismo. Já o cálcio, sódio e potássio formam ligações iônicas com dissoluções mais facilitadas em água, o que os torna elementos facilmente mobilizados no perfil (BUOL, 2011; NESBITT; YOUNG, 1982)

Para se chegar ao índice, utiliza-se a seguinte equação:

$$CIA = \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3]}{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]} * 100$$

Onde:

$[\text{Al}_2\text{O}_3]$ : Concentração de Óxido de Alumínio

$[\text{CaO}]$ : Concentração Óxido de Cálcio

$[\text{Na}_2\text{O}]$ : Concentração Óxido Sódio

$[\text{K}_2\text{O}]$ : Concentração Óxido de Potássio

O valor obtido oscila entre 0 a 100, índices CIA abaixo de 50 são considerados baixos e indicam que a amostra está pouco intemperizada, já valores acima de 70 indicam que a amostra está altamente alterada (NESBITT; YOUNG, 1982). No caso desta pesquisa, as amostras totais foram analisadas por Fluorescência de Raios X para determinação dos elementos maiores e perda ao fogo de amostras de solo e rocha totais.

### 4.3.3 Coeficiente Linear de Expansibilidade

Utilizando amostras dos solos previamente esboroadas e peneiradas, foram realizados ensaios para determinar o Coeficiente de Expansibilidade Linear (COLE) dos solos, com o intuito de determinar o grau de contração de argilas nos perfis estudados.

Para o cálculo do Coeficiente Linear de Expansibilidade (COLE) foi utilizado o método proposto em Schafer e Singer (1976). Para isso, selecionamos 50g de amostra de cada horizonte de seus respectivos perfis, essa amostra foi umedecida com água até chegar próximo ao ponto de saturação do solo. A amostra permaneceu em repouso por 24 horas.

Após esse período, cada amostra foi inserida em uma seringa com 1cm de diâmetro de saída. Apertando lentamente o êmbolo, fez-se de três a quatro hastes de aproximadamente 6cm a 10cm de comprimento, que permaneceram em repouso por mais 24 horas. Por fim, após as 24 horas, mediram-se as hastes secas. Com estes dados em mãos, obtém-se o COLE a partir da seguinte equação, sendo  $l_m$  o comprimento da haste úmida e  $l_d$  o comprimento da haste seca.

$$COLE = \frac{(l_m - l_d)}{l_d}$$

Após, realizou-se o cálculo da média do COLE obtido por hastes, o cálculo do desvio padrão e, por fim, o Coeficiente de Variação.

Segundo a metodologia utilizada, quando o índice se encontra entre 0.00 e 0.03 observa-se que a capacidade de contração e expansão do solo é reduzida, entre 0.03 a 0.06 é moderada, 0.06 a 0.09 alta e maior que 0.09 muito alta.

<u>Relação entre COLE e capacidade expansão e contração do solo</u>	
<b>COLE</b>	<b>Expansão e contração</b>
0.00 - 0.03	Pouco
0.03 - 0.06	Moderado
0.06 - 0.09	Alta
> 0.09	Muito alta

**Figura 4:** Relações COLE.  
**Fonte:** Adaptado de Schafer e Singer (1976)

Para o aprimoramento e tratamento dos dados, calculou-se também a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras:

$$\underline{x} = \frac{\sum x_1}{n}$$

Onde:

$\underline{x}$ : Média

$\sum x_1$ : Somatória das variáveis

n: Número de variáveis

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \underline{x})^2}{n}}$$

Onde:

Dp: Desvio Padrão

$x_1$ : Valor da variável

$\underline{x}$ : Média dos valores

n: número de variáveis

$$CV = \frac{Dp}{\underline{x}} \times 100$$

Onde:

CV: Coeficiente de Variação

Dp: Desvio Padrão

$\underline{x}$ : Média dos valores

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Descrição morfológica

O perfil 1, composto pelos horizontes pedológicos Ap, BA, Bv1, Bv2, Bv3 e Cr/R, foi preliminarmente classificado como Vertissolo Ebânico Órtico Saprolítico. Abaixo segue a descrição morfológica dos horizontes identificados.

O horizonte Ap apresenta indícios de alterações antrópicas, como o revolvimento do solo para cultivo. Foi identificado em uma profundidade de 0 a 11 cm. Quando úmido, apresenta cor cinzenta muito escuro, já quando úmido passa para cinzento-escuro. Sua textura é argilosa, apresentando estrutura moderada a forte, com tamanho de pequeno a médio, apresentando blocos subangulares e angulares. Sua consistência varia entre extremamente duro, friável e firme, quando úmido, e muito plástico e muito pegaçoso, quando molhado, o que evidencia a alta presença de argila. É comum a presença de fendas muito pequenas, não apresenta superfície

de *slickenside* e possui uma transição plana e clara entre horizontes. Cabe o destaque da presença de estrutura granular superficial muito pequenas.

O horizonte BA é uma transição que apresenta tanto características de B quanto de A. Foi observada numa profundidade de 11 a 25 cm. Quando úmido, apresenta cor cinzento muito escuro, já seco é cinzento-escuro. Sua textura é argilosa, apresenta estrutura forte de tamanho média a grande, sendo prismática e blocos angulares. Sua consistência seca é extremamente dura e firme, quando molhado é muito plástico e muito pegajoso. As fraturas apresentadas são comuns, variando de muito pequeno a média. Por fim, a transição é plana e clara.

Neste perfil foi identificado um horizonte B vértico, que são horizontes característicos de Vertissolos, com alta concentração de argilominerais expansíveis (como as esmectitas) . Pode-se observar que este horizonte apresenta textura argilosa e estrutura forte, média a grande e prismática que é friável se desfazendo em blocos angulares. Apresenta também superfície de *slickensides*, seu grau de desenvolvimento é moderado, quando seco apresenta consistência extremamente dura e firme, já quando úmido, sua consistência é muito plástica e muito pegajosa. Apresenta fendas médias a grandes (largura de 3 a 7 cm), sua transição é ondulada e clara. O perfil C/Cr foi observado na profundidade de 57 cm a 78 cm, apresentou coloração bruno-amarelado-claro, apresentando poucas manchas arredondadas (fragmentos de rochas), sua textura é franca e estrutura maciça. Sua consistência é ligeiramente plástica e não pegajosa.

O perfil Cr foi identificado na profundidade 78 cm a 180 cm. Composta de rocha matriz, saprolito de rocha máfica rica em mica esverdeada (dourada), este horizonte foi subdividido em quatro porções: ve, identificado como uma zona verde escura e textura franco-arenosa com muitos fragmentos de rocha; vc, identificado como uma zona verde clara com abundantes manchas de fragmento de rocha vermelho-acinzentadas, sua textura é franca; vf, veio felsico brancos, ortogonais com duas direções com 0.5 a 1 cm de diâmetro; bs, bolsão sacaroidal de xenólito variando entre bruno-amarelada-clara e bruno-olivácea-clara, com manchas brancas e cinzentas, a textura é arenosa com fragmentos de rocha, a hipótese é que essa região seja originária de alteração de granítóide. A transição C-R pode indicar que a origem do material parental pode ser tanto *in situ* quanto alóctone, uma vez que o contato gradual pode ser um indicie de origem autóctone, enquanto quando o contato é brusco, aposta para um depósito.

Já o perfil 2, apresenta os horizontes Ap, Bv1, Bv2, BC, C/Crk, Cr/C, Cr1 e Cr2, sendo classificado como Vertissolo Háplico Órtico Típico.

O horizonte Ap apresenta alterações antrópicas, com uma profundidade estimada de 0-11cm. Este horizonte possui a cor vermelho-escuro-acinzentado (úmido), com a presença comum de pequenos nódulos pretos de Mn. A textura é muito argilosa apresentando estrutura

moderada a forte, prismática com blocos subangulares e angulares. Sua consistência varia de friável a firme, quando úmido, e muito plástica e muito pegajosa, quando molhado. Suas fendas são comuns com tamanhos médios a muito grandes (2cm) e a transição é ondulada e clara.

O horizonte Bv1, localizado sob uma profundidade de 11 - 15cm, apresenta a coloração bruno-avermelhada quando úmido, também são comuns a presença de pequenos nódulos de Mn pretos. Sua textura também é muito argilosa, com estruturas moderada a forte e estrutura prismática de blocos angulares. Possui poucas superfícies de *slickensides* com grau de desenvolvimento moderado. Sua consistência é firme, muito plástica e muito pegajosa. As fendas são comuns, sendo de médias a grandes, sua transição é ondulada e clara.

Em uma profundidade de 55 - 97,5 cm, o horizonte Bv2 apresenta uma cor bruno-avermelhado-escura, também possui pequenos nódulos preto de Mn. A textura é muito argilosa, já a estrutura é moderada, prismática com blocos angulares. As superfícies de *slickensides* são poucas com um grau de desenvolvimento moderado. A consistência é firme, muito plástica e muito pegajosa, suas fendas são comuns, variando de médias a grandes.

Já o BC, encontrado na profundidade de 97,5 a 135 cm, apresenta matriz bruna-avermelhada-escura, possuindo algumas manchas cinzento-oliváceo-escuras, também com pequenos (1 a 3mm) nódulos de Mn pretos. Sua textura é argilo-siltosa. A estrutura é majoritariamente maciça com poucas partes moderadas, a estrutura também é prismática, com blocos moderados. Apresenta textura firme a muito firme, muito plástica e pegajosa. Não possui superfícies de *slickensides*, suas fendas poucas, mas grandes, apresenta transição apresentando transição ondulado e claro

O horizonte C/Crk, profundidade 135 a 162,5 cm, apresentou matriz bruna-avermelhada-escura, com presença comum de pequenas e médias (3mm a 1cm) manchas cinzento-oliváceo-escuras, além de manchas de carbonatos brancos médias a grandes (1cm a 3cm). Sua textura é argilo-siltosa, apresentando estrutura maciça firme e extremamente firmes, apresentando consistência muito plástica e pegajosa.

O horizonte Cr/C está a uma profundidade de 135 a 162,5 cm, sua matriz é cinzenta-escura, é comum achar pequenas a grandes (0,5cm a 2cm) manchas bruno-oliváceo-escuras. Sua estrutura é maciça, muito firme e porções extremamente firmes

Já o horizonte Cr1, profundidade 162,5 a 190 cm, possui uma coloração cinzenta-escura, possui lentes carbonáticas e estrutura maciça extremamente firmes. Por fim, o horizonte Cr2, com profundidade 170 a 190 cm, possui cor cinzento muito escura com estrutura laminar plano paralela, extremamente firme.

No Perfil 3, foi possível identificar os horizontes A, BA, Bv1, Bv2, Bv3 e Cr/R. Na primeira aproximação foi classificado como Vertissolo Háplico Órtico típico.

O horizonte A, de profundidade estimada de 0 a 11 cm, apresenta matriz bruno-escura (seco), sua textura é muito argilosa, apresentando estrutura moderada a forte do tipo prismática de blocos subangulares e angulares. A consistência é muito a extremamente dura, quando seco, friável a firme, quando úmido, e muito plástica e muito pegajosa quando molhado. Apresenta fissuras comuns e médias (2mm a 5mm).

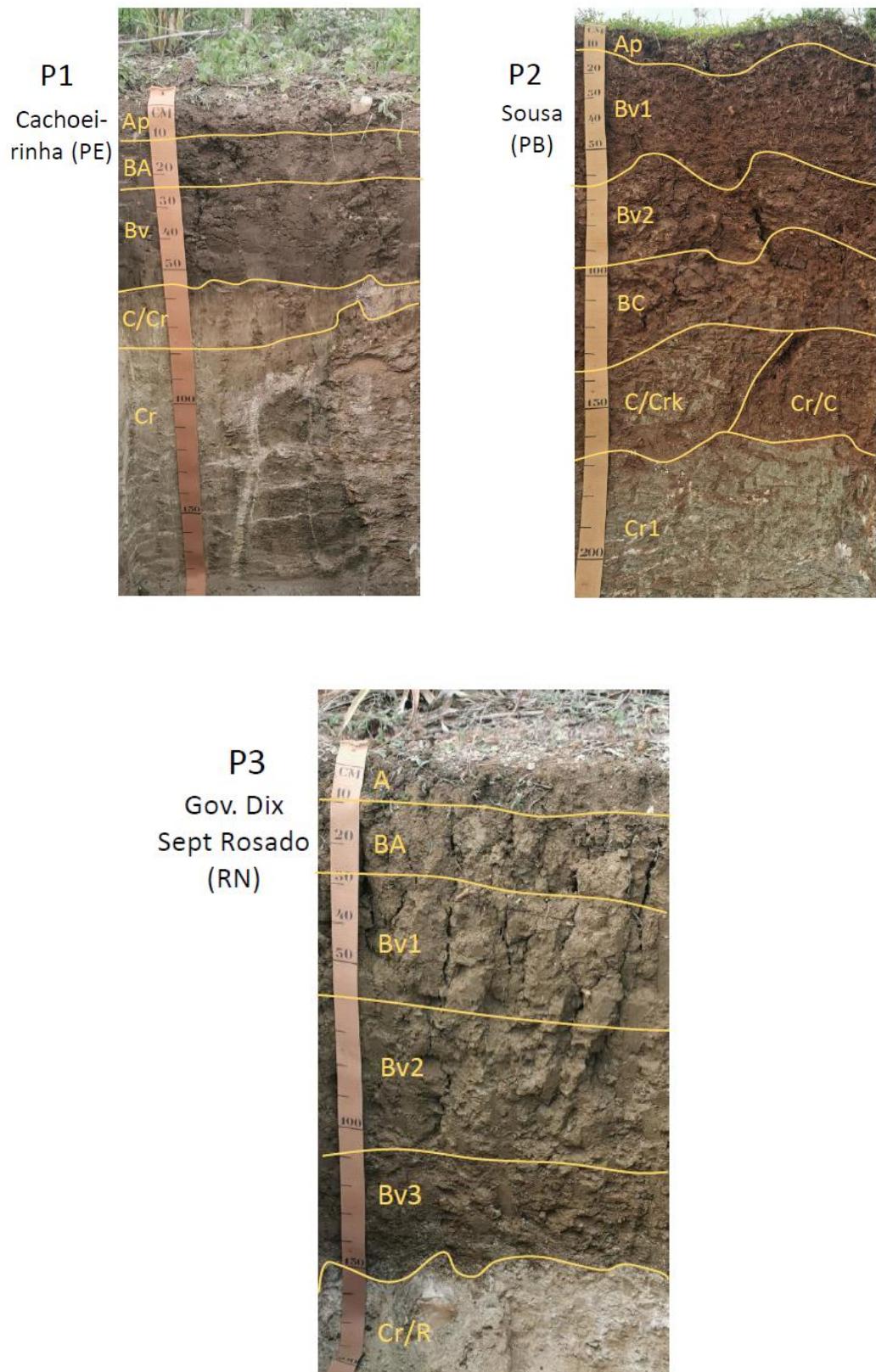
O horizonte BA, de profundidade 10 cm a 28 cm, possui matriz bruno-olivácea (seco) com textura muito argilosa. Sua estrutura é moderada a forte com tipo prismático e blocos subangulares e angulares. Sua consistência é friável a firme, sendo muito plástico e muito pegajoso. Possui fendas abundantes médias a grandes (0,4 cm a 1,5 cm).

O horizonte Bv1 está na profundidade 28 a 60cm, com cor bruno-oliváceo-claro (seco), sua textura é muito argilosa. Apresenta estrutura moderada a forte, grande a muito grande (6 cm a 12 cm), sendo ela prismática composta de blocos angulares. A consistência é firme, muito plástica e muito pegajosa, suas fissuras são abundantes variando de grandes a muito grandes (0,5 cm a 2,5 cm).

Já o horizonte Bv2 está na profundidade 60 cm a 110 cm, com matriz bruno-oliváceo-claro (seco), a textura é muito argilosa. A estrutura é moderada a forte, prismática, composta de blocos angulares e cuneiforme. Apresenta abundantes superfícies *slickensides* moderada a fortemente desenvolvidas. A consistência desse perfil é firme, muito plástica e muito pegajosa, apresentando fissuras comuns de tamanho médio a muito grandes (0,3 cm a 2.5cm).

O horizonte Bv3 está em uma profundidade de 110 cm a 137,5 cm, sua matriz é bruno-oliváceo-claro (úmido) sendo muito argiloso. A estrutura é fraca sendo grande a muito grande (6cm a 12cm) predominantemente prismática. As superfícies de *slickensides* são comuns com grau moderado a forte, a consistência é firme, muito plástica e muito pegajosa. Suas fendas são muito pequenas e comuns.

O último horizonte identificado foi o Cr/R na profundidade 137,7 cm a mais de 165 cm. A matriz varia entre branco-rosado, bruno-claro-acinzentado e bruno-amarelados. É possível observar a presença de carbonatos e blocos residuais de calcário. Sua textura é franco-argilo-arenosa, com estrutura maciça, a matriz é friável, mas a parte mosqueada é extremamente firme. A consistência molhada apresentada é plástica e pegajosa. Nos perfis Bv1, Bv2, Bv3 e Cr/R foi observada reação com HCl indicando a presença de carbonatos.



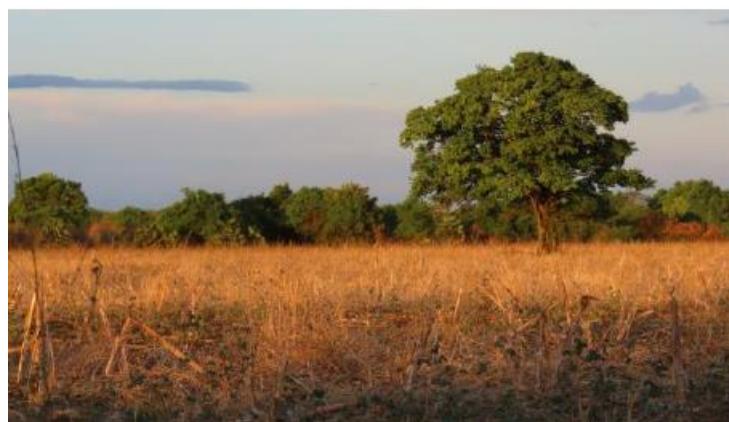
**Figura 5, 6 e 7:** Imagens P1, P2 e P3  
**Fonte:** Sheila Furquim



**Figura 8:** Paisagem associada P1  
**Fonte:** Sheila Furquim



**Figura 9:** Paisagem associada P2  
**Fonte:** Sheila Furquim



**Figura 10:** Paisagem associada P3  
**Fonte:** Sheila Furquim

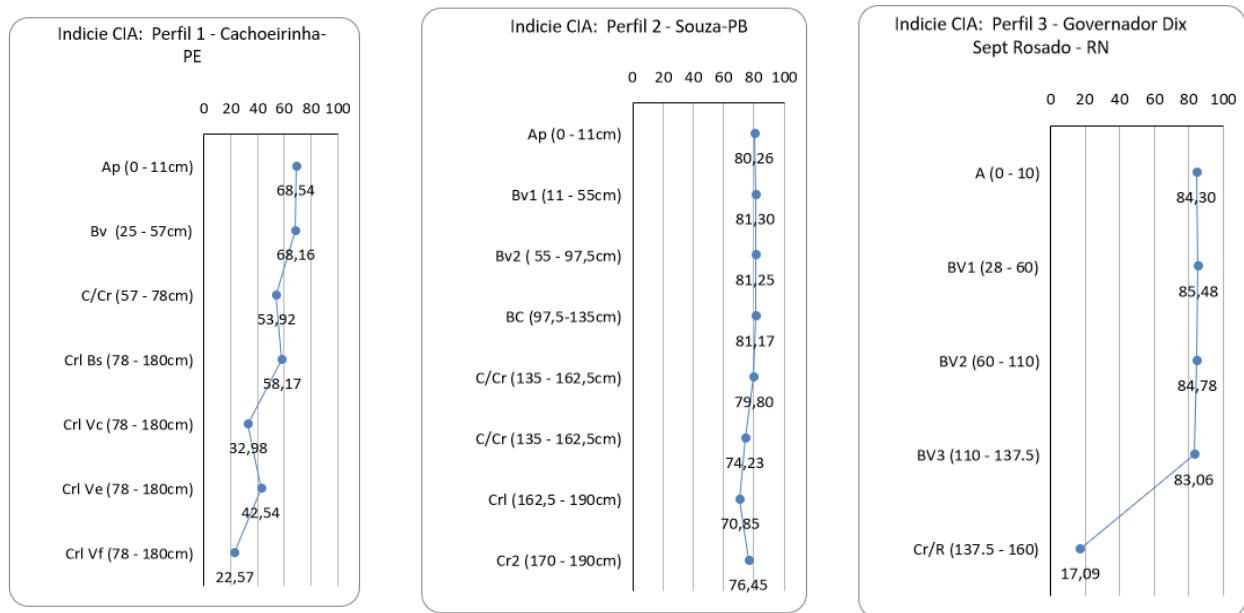
## 5.2 Índice de intemperismo CIA

Para o Perfil 1 (figura 1), foram observadas variações pronunciadas nos índices de intemperismo CIA ao longo dos horizontes. Por exemplo, nos horizontes Ap e Bv, o índice de

intemperismo inicial foi de 68, reduzindo-se gradualmente à medida que se aproxima do horizonte C, alcançando um mínimo de 22. É importante destacar que os horizontes Crl Bs (58.17), Vc (32.98), Ve (42.54) e Vf (22.57) exibem variações significativas em profundidade, sendo identificados como intrusões dentro do horizonte Cr, além disso, destaca-se a presença de uma alta concentração de CaO no subhorizonte Crl Vf.

No Perfil 2 (figura 2), os resultados dos índices de intemperismo CIA indicam que os horizontes Ap, Bv1, Bv2 e BC apresentam as taxas mais elevadas de intemperismo, oscilando entre 81 e 70. No entanto, em maiores profundidades, os horizontes C/Cr, Cr1 e Cr2 demonstram os menores graus de intemperismo, sendo que estes dois últimos variam lateralmente, com o horizonte Cr1 exibindo o menor grau de intemperismo nesses perfis, oscilando de 79.8 para C/Cr, 74,23 para C/Cr2, 70,85 para Cr1 e 76,45 para Cr2.

Por fim, no Perfil 3 (figura 3), os horizontes A, Bv1, Bv2 e Bv 3 exibem índices de intemperismo CIA similares, variando de 85 a 83. Já no horizonte Cr/R, observa-se uma redução significativa nos valores, chegando a 17.



**Gráfico 1, 2 e 3:** Resultado de CIA perfil 1, 2 e 3.

**Fonte:** Próprio autor.

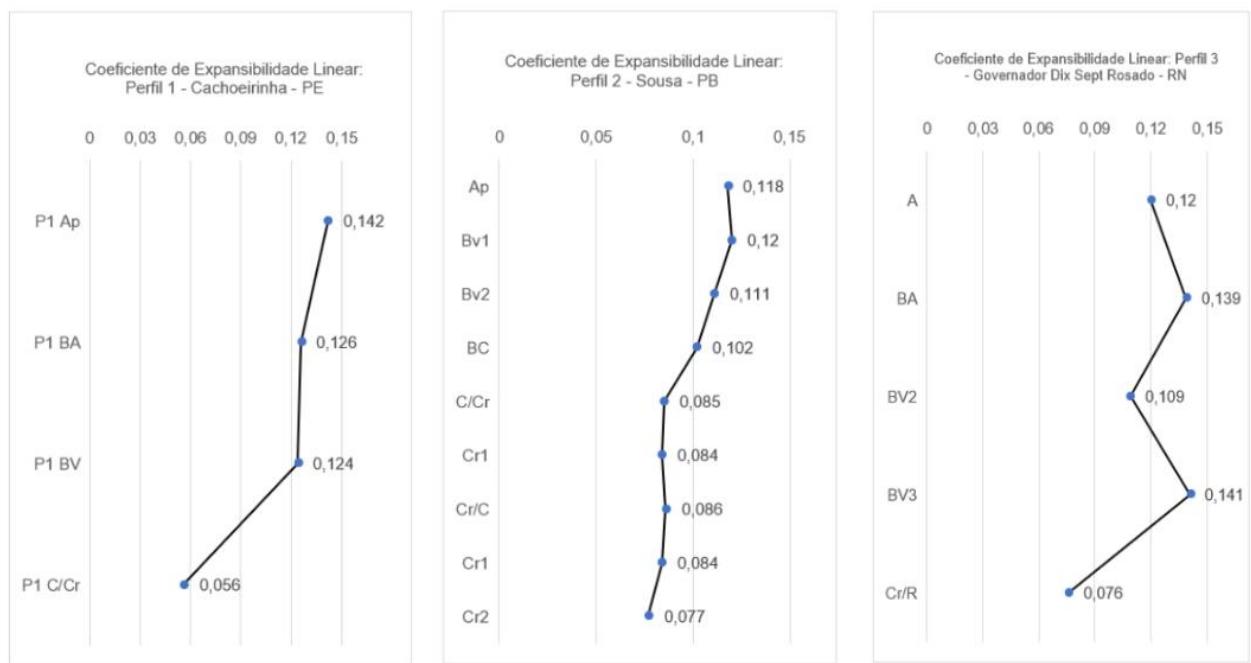
### 5.3 COLE

Como mencionado anteriormente, o Coeficiente de Expansibilidade Linear (COLE) é uma ferramenta útil para identificar a presença de argilominerais com propriedades expansivas, especialmente esmectitas. Dada a natureza da movimentação interna dos Vertissolos, que resulta em fendas, superfícies de *slickenside* e microrrelevos *gilgai*, é razoável esperar que esses solos apresentem um coeficiente considerável de expansibilidade.

No Perfil 1 (figura 4), observou-se que as variações do COLE estavam em conformidade com as expectativas. Nos horizontes Ap, BA e BV, foi evidente uma capacidade de expansão e contração significativa, excedendo 0,09. Entretanto, no horizonte C/Cr, próximo à interface com a rocha, a capacidade de expansão foi mais moderada, variando entre 0,03 e 0,06. É relevante mencionar que não foi possível realizar a medida no horizonte Cr. Para essa análise, os cilindros são formados utilizando uma seringa, mas devido à textura arenosa dos solos, os cilindros do horizonte Cr não puderam ser moldados. Essa limitação sugere a possibilidade de inadequação desse método, já que solos com essas características podem não permitir a obtenção de dados precisos.

No Perfil 2 (figura 5), os resultados obtidos foram consistentes com as observações de campo. Nos horizontes Ap, BV1 e BV2, o COLE excede 0,09, indicando um potencial muito alto de expansão e contração. Essa observação era esperada, considerando a textura mais argilosa identificada nesses horizontes, além das características verticais nos horizontes BV. O horizonte BC registrou um COLE de 0,102, classificando-o como tendo uma capacidade muito alta de expansão e contração. Esses resultados eram antecipados, uma vez que o horizonte B é conhecido por conter uma concentração máxima de argilominerais, apesar de também exibir características do horizonte C. Quanto aos horizontes C/Cr, Cr/C e Cr1, os coeficientes oscilaram entre 0,085, 0,086 e 0,084, respectivamente, indicando uma capacidade alta de expansão e contração. Por fim, o horizonte Cr2, o mais próximo da rocha e, portanto, menos quimicamente intemperizado, apresentou o COLE mais baixo, 0,077, embora ainda seja considerada alta sua capacidade de expansão e contração.

No Perfil 3 (figura 6), os horizontes A, BA, BV2 e BV3 exibiram um valor elevado para o COLE, superior a 0,09, indicando uma expansão e contração muito alta. Quanto ao horizonte Cr/R, foi obtida uma média de COLE de 0,076, classificando-o com uma taxa alta de expansão e contração.

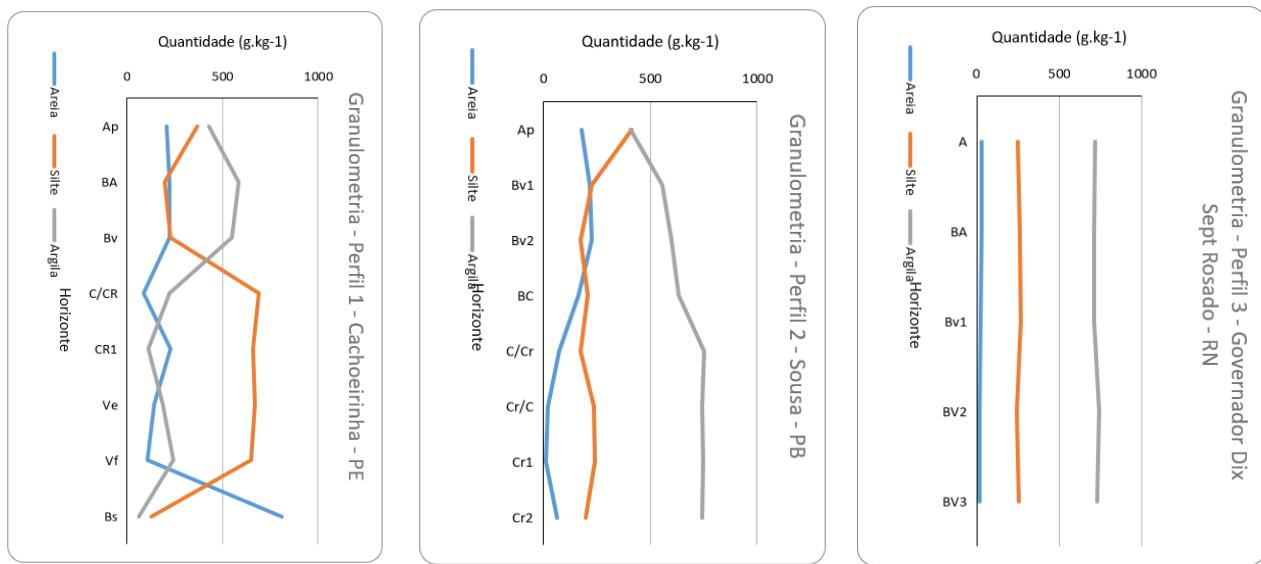


#### 5.4 Granulometria

No Perfil 1 (figura 7), é notável a predominância das frações de argila nos horizontes Ap, BA e BV ( $426 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), o que coincide com as análises texturais e de consistência realizadas em campo. Ao longo do perfil, ocorre uma redução da fração de argila e um aumento do silte, enquanto a areia tende a oscilar. Com o aumento do silte, os horizontes C/Cr, Cr1, Ve e Vf são classificados como Franco-siltosos. No entanto, no horizonte Bs, observa-se a predominância de areia ( $811 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), com predominância das frações grossas e muito grossas.

No Perfil 2 (figura 8), verifica-se que o horizonte A possui a maior quantidade de fração de silte ( $414 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), porém, essa fração diminui nos horizontes subsequentes em profundidade. Em relação à argila, observa-se um aumento significativo, especialmente do tipo grossa, indo de  $409 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  no horizonte Ap para  $740 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  no horizonte Cr2.

Por fim, no Perfil 3 (figura 9), os dados granulométricos permanecem estáveis ao longo do perfil. A fração de areia total varia entre  $32$  e  $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , o silte entre  $268$  e  $243 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , e a argila também se mantém estável, com predominância da fração grossa variando entre  $648 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  e  $618 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Todos os horizontes são classificados como muito argilosos.



**Figura 7, 8 e 9:** Resultado da granulometria perfil 1, 2 e 3.  
**Fonte:** Próprio autor.

## 6. DISCUSSÃO

No que tange ao Perfil 1, as observações de campo indicam que os horizontes Ap, BA e BV exibem graus mais elevados de intemperismo em comparação com os horizontes C/Cr e Cr. Esta inferência é suportada pelo desenvolvimento pedogenético desses horizontes, que apresentam altos teores de argila e são moderadamente a fortemente estruturados, além de exibirem uma consistência excessivamente pegajosa. Os resultados obtidos por meio do índice de intemperismo CIA corroboram a maior intemperização dos perfis Ap e BV em relação aos demais horizontes C, demonstrando uma diminuição do índice ao longo dos horizontes C/CR e Cr. Da mesma forma, o coeficiente de expansibilidade linear destaca os horizontes Ap, BA e BV como possuidores de uma alta capacidade expansiva. Esta observação é também confirmada pela presença de fendas e superfícies de *slickensides* nestes horizontes, evidenciadas durante as análises de campo. Por outro lado, no horizonte C/CR, observa-se uma redução abrupta na capacidade expansiva, refletida pelo decréscimo do índice de COLE de 0,124 no horizonte BV, para 0,056 no horizonte C/CR, indicando uma redução significativa na presença de argilominerais com capacidade expansiva. Assim, o avanço do intemperismo dos minerais primários e a formação de minerais secundários, no caso as esmectitas, nos horizontes mais próximos à superfície resultam em maiores índices COLE. As análises granulométricas revelam que os perfis Ap, BA e BV exibem uma classe textural argilosa, o que está em consonância com as altas taxas de COLE e CIA.

A análise granulométrica revela uma redução acentuada na presença de argila a partir do horizonte C/Cr, acompanhada de um aumento significativo na fração de silte e pouca alteração na fração de areia. O aumento do silte corrobora com os menores índices de intemperismo revelados pelo índice CIA. No horizonte Cr/Bs, observa-se uma redução considerável tanto na fração de argila total quanto de silte, acompanhada de um aumento expressivo na fração de areia total, classificando esta porção como areia-franca. Durante as observações de campo, foi identificada uma zona cinza clara, horizonte Cr/Vf, maciça neste horizonte, possivelmente correspondendo a um veio de inclusão de quartzo. A alta presença de areia nesses horizontes subsuperficiais está provavelmente relacionada ao corpo sieníticos que compõem o embasamento rochoso. Essas heterogeneidades dentro do maciço rochoso podem explicar a discrepância nos índices de intemperismo CIA entre o Cr1 Bs (58) e o Cr1 Vf (22).

No Perfil 2, as análises de campo revelaram que os horizontes Ap, Bv1 e Bv2 exibiram uma estrutura moderada a forte, com consistência friável a firme, indicando um maior grau de intemperização. Os resultados da análise granulométrica revelaram uma textura argilo-siltosa nos horizontes Ap, ao passo que os horizontes Bv1 e Bv2 foram classificados como argilosos, contrastando com a observação de campo de uma textura muito argilosa. A classificação textural de muito-argiloso foi identificada nos horizontes BC, C/Cr, Cr/C, Cr1 e Cr2. Essa textura está relacionada provavelmente não à formação de materiais argilosos nos solos, como no perfil 1, proveniente de rocha magmática, mas a herança de rocha sedimentar já argilosa. Os dados obtidos pelo índice de intemperismo CIA indicaram que todos os horizontes deste perfil exibem um grau considerável de intemperismo, especialmente os horizontes Ap, Bv1, Bv2, BC e C/Cr, com oscilação entre 81 e 79. Para os demais horizontes, o nível variou entre 79 e 70. Paralelamente, os resultados do coeficiente de expansibilidade linear se assemelham aos obtidos no índice CIA, com os horizontes Ap, Bv1, Bv2 e BC apresentando um coeficiente acima de 0,100, classificados como muito altos. Já para os horizontes C/Cr, Cr/C, Cr1 e Cr2, os valores variaram entre 0,085 e 0,077, classificando-os com propriedades de alta expansibilidade (SCHAFER; SINGER, 1976). Essa observação também estava de acordo com as expectativas, já que esses horizontes consistem em materiais que parecem ser herdados do embasamento rochoso, que é uma rocha sedimentar com presença de argila.

Essas análises evidenciam que os horizontes Ap, Bv1, Bv2 e BC possuem maiores graus de alteração em comparação com os subsequentes, apresentando uma maior concentração de argilominerais expansivos e maiores índices de grau de alteração. As análises de campo, baseadas em metodologias descritas por Santos (2015), que classificaram os horizontes Bv1 e Bv2 como vérticos, mostraram-se precisas e consistentes.

Entretanto, para os horizontes C/Cr, Cr1 e Cr2, também foram observados valores de CIA consideráveis. Novamente, os valores de CIA estão sendo influenciados por propriedades herdadas da rocha subjacente, já composta por minerais de argila formados em um paleoperfil de solo, que foram erodidos, transportados, depositados e transformados em rocha sedimentar. Assim, o uso do índice precisa ser avaliado caso a caso, sendo necessário considerar se as argilas realmente refletem uma formação *in situ* e, portanto, alto grau de intemperismo.

No Perfil 3, as observações de campo revelaram que os horizontes Ap, BA, Bv1, Bv2 e Bv3 apresentavam uma textura muito argilosa, enquanto o horizonte Cr/R foi classificado como franco-argiloso-arenoso. Esses resultados estão em concordância com os índices de intemperismo, que variaram de 85 a 83 para os horizontes A, Bv1, Bv2 e Bv3, enquanto no horizonte Cr/R houve um acentuado decréscimo na taxa de intemperismo, caindo para 17. Além disso, a análise de refração de raios-X revelou um aumento na concentração de CaO, possivelmente relacionado ao contato com a rocha matriz, predominantemente composta por biomicrito e calcário.

Através do coeficiente de expansibilidade linear, foi observado que os perfis A, BA, Bv2 e Bv3 apresentavam taxas muito altas (SCHAFER; SINGER, 1976), variando entre 0,109 e 0,141. Esses resultados eram esperados, uma vez que este perfil possui dois horizontes B verticais, o que evidencia uma significativa concentração de argilominerais expansivos. Essas taxas estão em acordo com as observações de campo, onde foram identificadas fissuras e superfícies de *slickensides* nos perfis Bv2 e Bv3. Assim, as observações de campo, juntamente com os coeficientes obtidos em COLE e o índice de intemperismo CIA, indicam que os horizontes superficiais passaram por um intenso processo de intemperismo. Esses resultados também estão em consonância com os obtidos através da análise granulométrica, onde foi observado que os horizontes, com exceção do Cr/R, apresentam uma textura muito argilosa, corroborando as observações de campo.

Assim, por meio da análise de campo, COLE e índice CIA, é possível interpretar que o horizonte Cr/R possui significativo menor grau de intemperismo que os demais superficiais. Contudo, sua alteração é presente, embora em uma taxa muito reduzida quando comparada com os demais.

Ao observar o grau de alteração dos três perfis, notamos que o perfil 2 (litologia composta por siltitos e folhelhos) e o perfil 3 (litologia composta pela Formação Jandaíra) apresentam graus mais elevados de alteração ao longo do perfil do solo, em comparação com o perfil 1 (constituído por sienitos e granitos shoshoníticos), que exibe um grau relativamente menor de alteração. Em todos os três perfis, à medida que se analisam as características físicas

do solo em profundidade, observa-se uma redução no grau de alteração, embora esta persista, embora em intensidade consideravelmente reduzida em comparação com os perfis subjacentes. Esse resultado era esperado, considerando a proximidade deste horizonte com a rocha matriz, o que naturalmente resulta em um menor grau de intemperismo. Além disso, o índice de intemperismo CIA se mostrou complementar ao coeficiente de expansibilidade linear e às observações de campo.

Ao observar a bibliografia que utilizou o índice de intemperismo CIA, nota-se diversos valores para diferentes regiões e tipos de rochas. No estudo de Sharma e Rajamani (2000) sobre intemperismo em solo semiárido na Índia, o índice CIA foi de 24 para rocha sã e 54 para rochas alteradas, com material de origem sendo anfibolito. Em Yousefifard *et al.* (2012), analisando solos semiáridos no Irã, o índice CIA variou de 55 a 60 em *inceptisols* de origem plutônica e de 60 a 74 para solos de origem vulcânica. Em Goydaragh *et al.* (2021), em solos analisados no Irã, observou-se que em *Aridisol*, com material de origem de sedimentos de leques aluviais e terraços, houve uma variação de CIA de 31 a 50. Nos achados desta pesquisa, também em ambientes semiáridos, os dados mostram valores de CIA, em geral, mais elevados que os resultados da bibliografia.

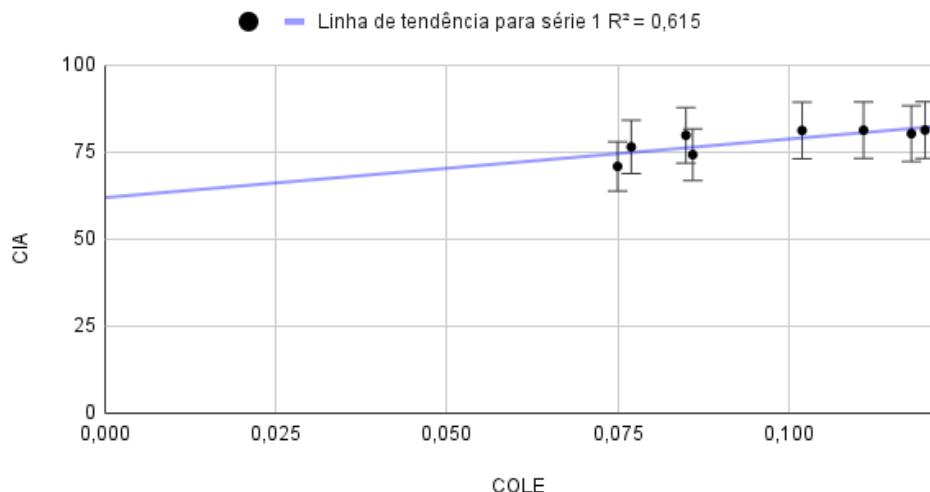
O P3 apresenta índices de intemperismo mais elevados em comparação aos perfis 1 e 2 devido à presença da rocha matriz sedimentar (calcário). O calcário é mais suscetível ao intemperismo porque é composto principalmente de carbonato de cálcio, que reage facilmente com ácidos presentes na água da chuva e no solo. Esse processo, envolve a dissolução do calcário em soluções ácidas, resultando na formação de bicarbonato de cálcio, que é facilmente lixiviado. Além disso, a estrutura cristalina do calcário facilita a infiltração de água, acelerando sua degradação em comparação com rochas mais resistentes, como as ígneas ou metamórficas.

Cabe destacar que os resultados obtidos no Perfil 2 devem ser interpretados com cautela, pois a alta concentração de argila observada pode ser em grande parte oriunda da rocha matriz sedimentar. Esse tipo de rocha é conhecido por conter quantidades significativas de minerais argilosos, que podem influenciar os índices de intemperismo obtidos.

Por meio desses resultados, surge uma nova indagação sobre a possível relação estatística entre o coeficiente de expansibilidade linear e o índice de intemperismo CIA. Ao conduzir uma análise de correlação entre essas variáveis, foi obtido um coeficiente de correlação de Pearson de 0,784 para o perfil 2 e 0,902 para o perfil 3. Entretanto, devido à insuficiência de dados, não foi possível realizar essa análise estatística para o perfil 1. Esses resultados indicam uma forte associação entre o coeficiente de expansibilidade linear e o índice

de intemperismo CIA nos perfis 2 e 3, destacando a importância de investigar essa relação em futuros estudos e sua possível implicação nos processos de intemperismo e expansão do solo.

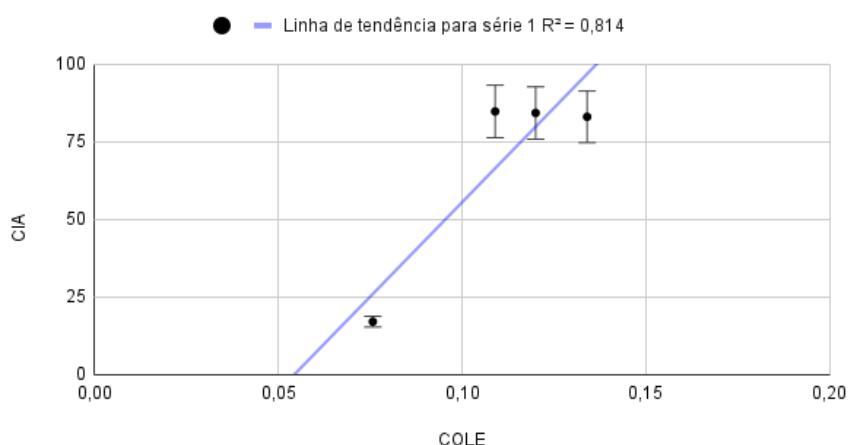
### Correlação COLE e CIA no Perfil 2



**Gráfico 10:** Correlação entre Coeficiente de Expansibilidade Linear e Índice de intemperismo CIA para o Perfil 2.

**Fonte:** Próprio autor.

### Correlação COLE e CIA no Perfil 3



**Gráfico 11:** Correlação entre Coeficiente de Expansibilidade Linear e Índice de intemperismo CIA para o Perfil 3.

**Fonte:** Próprio autor.

A formação dos argilominerais 2:1, conhecidos por sua estrutura expansiva, é frequentemente observada em zonas de bissialitização, onde os processos de intemperismo ocorrem de maneira moderada. Nessas áreas, as condições ambientais propiciam a

transformação gradual de minerais primários em argilominerais secundários (BRADY; WEIL, 2013).

Por outro lado, em regiões sujeitas a processos mais intensos de intemperismo, a formação de argilominerais do tipo 1:1 é predominante. Estes minerais não apresentam a mesma tendência expansiva de seus homólogos 2:1. Essa distinção na composição mineral reflete as condições ambientais específicas e os níveis variados de atividade de intemperismo ao longo do tempo geológico (BARBOSA, 2017; BLOOM, 2000; BUOL *et al.*, 2011; SOIL SURVEY STAFF, 1999).

No perfil de intemperismo, é notável que até mesmo os horizontes mais profundos, como o C/Cr do perfil 1 e C/Cr, Cr1 e Cr2 do perfil 2, revelam significativos graus de alteração, conforme demonstrado pelo índice CIA. Além disso, esses horizontes exibem uma variedade de taxas de expansibilidade linear, que variam de altas a moderadas. Cabe destacar que a discrepância nos níveis de intemperismo se torna mais evidente à medida que nos aproximamos da rocha inalterada. No perfil 3, por exemplo, o horizonte Cr/R registra o menor valor de índice CIA, marcando apenas 17,09. Durante a análise morfológica em campo, observou-se que esse horizonte apresentava uma estrutura maciça extremamente firme. Esses resultados sugerem que, à medida que nos aprofundamos no solo, os horizontes tendem a exibir um menor desenvolvimento, indicando uma intensidade crescente nos processos de intemperismo ao longo do perfil.

Em relação ao CIA comparando os dois perfis, observa-se que as diferenças de CIA entre a rocha e o solo são superiores no shoshonito/sienito (P1), que são rochas com minerais facilmente intemperizáveis, já no siltito (P2), observamos uma maior homogeneidade no grau de desenvolvimento dos horizontes, refletindo o material de origem. Assim, constata-se que, mesmo sob clima semiárido, pode haver perdas importantes de matéria devido a processos de intemperismo e pedogênese nos Vertissolos.

Com base nos resultados obtidos e nas discussões anteriores, surge uma importante questão a ser explorada: o solo desempenha múltiplas funções em relação aos processos naturais, incluindo sua influência na modelagem do relevo. Segundo Jenny (1994), o solo não é apenas um produto da interação com o relevo, mas também pode ser um agente ativo na formação de processos de aplanação.

Nesse contexto, destaca-se o processo de etchplancação proposto por Büdel (1982), que incorpora fatores climáticos e pedológicos em suas análises. A etchplanção, caracterizada pela combinação de processos de erosão, intemperismo químico e pedogenéticos, ocorre

predominantemente em ambientes tropicais, resultando no rebaixamento do relevo e na formação de inselbergs como vestígios desse processo (BÜDEL, 1982; VITTE, 2005).

Observa-se também a ocorrência de intemperismo químico em rochas em regiões semiáridas, como demonstrado no estudo de caso de rochas ígneas no semiárido iraniano (YOUSEFIFARD *et al.*, 2012), sugerindo a necessidade de investigar como esse processo contribui de forma local para o aplainamento do relevo nas paisagens observadas nos perfis 1, 2 e 3.

Considerando que uma das etapas da etchplanação é a ocorrência de intemperismo químico, abre-se espaço para novas investigações e análises a fim de compreender se e como esse processo pode ocorrer em regiões semiáridas. Segundo Maia *et al.* (2018), é possível observar a ocorrência desse processo em algumas partes do nordeste brasileiro, principalmente em regiões de rocha granítica, sendo influenciado principalmente por fatores climáticos e variações pretéritas, com destaque para o contexto do Quaternário.

Além disso, o processo de pediplanação, influenciado por fenômenos de intemperismo e erosão, é relevante para compreender a formação de superfícies de pediplano em regiões com climas úmidos e semiáridos. Este processo é principalmente influenciado por fenômenos de intemperismo e erosão, especialmente de natureza fluvial e eólica. A pediplanação é o principal processo atuante em regiões com alternância de climas úmidos e semiáridos, havendo a formação de superfícies de recuo de vertentes e colinas, resultando na regressão de escarpas e, consequentemente, na expansão de áreas planas. Entretanto, vale ressaltar que esse processo pode ocorrer de forma desigual (KING, 1953; MAIA, 2018; MAIA; BEZERRA, 2012).

Diante disso, sugere-se que futuras pesquisas abordem mais profundamente a interação entre o solo, o relevo e os processos de aplainamento, especificamente nas paisagens do semiáridos apresentadas nesta pesquisa. Investigações sobre a influência do intemperismo químico e de processos pedogenéticos na evolução do relevo podem contribuir significativamente para ampliar o entendimento sobre a dinâmica do ambiente terrestre e suas implicações para a geomorfologia, tendo em vista as relações de pedogênese e intemperismo para a escala abordada.

## **7. CONCLUSÃO**

A análise dos três perfis de solo revela uma complexidade significativa nos processos de intemperismo e pedogênese. No Perfil 1, os horizontes superficiais, como Ap, BA e BV, exibem sinais de intemperismo mais pronunciados, caracterizados por estruturas fortemente desenvolvidas e consistência excessivamente pegajosa. Essas características são consistentes

com uma alta presença de argilominerais expansivos, provavelmente formados *in situ*, conforme indicado pelos índices de intemperismo e coeficientes de expansibilidade linear. A textura argilosa predominante nesses horizontes sugere uma forte influência dos processos pedogenéticos, corroborando as observações de campo e análises granulométricas.

No Perfil 2, os horizontes Ap, Bv1 e Bv2 apresentam estruturas moderadas a fortes, juntamente com índices de intemperismo e coeficientes de expansibilidade linear elevados. É importante destacar que nesse caso os altos teores de argila e altos valores de CIA estão em maioria relacionados como a rocha sedimentar que embasa o perfil.

Já no Perfil 3, os horizontes superficiais demonstram uma textura muito argilosa, em linha com os índices de intemperismo e coeficientes de expansibilidade linear elevados. As observações de campo e análises granulométricas sustentam esses resultados, destacando a influência dos processos de intemperismo e pedogênese na formação desses horizontes. Os valores de CIA foram os maiores nesse perfil devido à alta suscetibilidade do calcário ao intemperismo.

A correlação estatística entre o coeficiente de expansibilidade linear e o índice de intemperismo CIA nos Perfis 2 e 3 sugere uma associação significativa entre essas variáveis, indicando a importância desses parâmetros na compreensão dos processos de intemperismo e expansão do solo. No entanto, é importante ressaltar que a correlação encontrada entra em contraste com algumas interpretações teóricas sobre a formação de argilominerais expansivos, o que sugere a necessidade de investigações adicionais para entender melhor essa relação.

Observa-se que os dados físicos e químicos das três diferentes litologias transmitem informações relevantes sobre o grau de alteração ao longo do perfil de intemperismo. Os dados obtidos apresentam formas diversas e importantes de correlação, destacando-se a necessidade de análises complementares, como densidade e porosidade, para uma compreensão mais abrangente.

As três litologias revelaram múltiplas formas de alteração e propriedades ao longo do horizonte de intemperismo. Portanto, uma compreensão eficaz demanda a consideração de diversos aspectos, tais como textura do solo, índice de grau de intemperismo, coeficiente de expansibilidade linear e análises de campo. Esses elementos convergem para uma interpretação mais precisa do perfil de intemperismo e de suas propriedades.

## REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. O planalto da Borborema, na Paraíba. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, v. 1, n. 13, p. 54-73, 1953.
- AB'SABER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do nordeste brasileiro. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 19, p. 1-38, 1969.
- ALMEIDA, A.R.; ULRICH, H.H.G.J. Granitos shoshoníticos do nordeste do Brasil: características petrográficas e químicas. **Boletim IG-USP**, São Paulo, n.18, p. 47-19, out. 1996.
- BARBOSA, G. M. N. **Gênese e caracterização geotécnica de Vertissolos do Estado da Bahia**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- BELTRÃO, B. A. *et al.* **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Pernambuco: Diagnóstico do município de Cachoeirinha**. CPRM/PRODEEM: Recife, 2005. 20 p. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/15750/1/Rel\\_Cachoeirinha.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/15750/1/Rel_Cachoeirinha.pdf). Acesso em: 23 agosto 2023.
- BELTRÃO, B. A. *et al.* **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Paraíba: Diagnóstico do município de Sousa (PB)**. CPRM/PRODEEM: Recife: 2005a. 34 p. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16424/1/Rel\\_Sousa.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16424/1/Rel_Sousa.pdf). Acesso em: 23 agosto 2023.
- BELTRÃO, B. A. *et al.* **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Rio grande do norte Diagnóstico do município de Governador Dix Sept (RN)**. CPRM/PRODEEM: Recife, 2005b. 24 p. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16965/1/rel\\_gov\\_dix\\_sept.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16965/1/rel_gov_dix_sept.pdf). Acesso em: 23 agosto 2023.

BRADY, Nyle. C; WEIL, Raymond. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos.** Tradução: Igo Fernando Lepsch. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716 p.

BREEMEN, Nico. Van.; BUURMAN, Peter. **Soil Formation.** 2. ed. New York. Kluwer Academic Publishers, 2002. 393 p.

BRIERLEY, J. A.; STONEHOUSE, H. B.; MERMUT, A. R. Vertisolic soils of Canada: Genesis, distribution, and classification. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 91, n. 5, p. 903–916, out. 2011.

BLOOM, Arthur. Leroy. **Superfície da Terra.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 184 p.

BÜDEL, J. **Climatic geomorphology.** 1 ed. Princeton: Princeton University Press, 1982. 443 p.

BUOL, Stanley. W. *et al.* **Soil Genesis and Classification.** 6. ed. Oxford; Wiley -Blackwell., 2011. 544 p.

CASPARI, T.; BÄUMLER, R.; NORBU, C.; TSHERING, K.; BAILLIE, I. Geochemical investigation of soils developed in different lithologies in Bhutan, Eastern Himalayas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, p. 436-458, 2006.

CLAUDINO-SALES, V.; MONTEIRO, K. de A.; MAIA, R. P.; CORREA, A. C. B. de. Estado da arte dos estudos geomorfológicos no nordeste brasileiro: uma síntese (e várias teses). In: JÚNIOR, O. A. C. *et al.* (org). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira.** v. 1. Brasília: Selo Caliandra, 2022. cap. 30, p. 849-878.

CORRÊA, A.C.B; TAVARES, B.A.C; MONTEIRO, K.A; CAVALCANTI, L.C.S; LIRA, D.R. Megamorfologia e Morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, n. 1-2, p. 35-52, 2010. DOI 10.5935/0100-929X.20100003. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/rig/article/view/405>. Acesso em: 14 maio 2024.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. de. **Fauna de Solo: Aspectos gerais e metodológicos.** Seropédica: Embrapa, 2000. 46 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/27350/1/doc112.pdf>. Acesso em: 14 de maio 2024.

COULOMBE, C. E.; DIXON, J. B.; WILDING, L. P. Mineralogy and chemistry of vertisols. In: AHMAD, N. MERMUT, A. (org). **Vertisols and Technologies for Their Management.** 1. ed. Amsterdã: Elsevier Science, 1996. cap. 5, p. 115-200.

DREVER, James. I. **The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments**. 3. ed. New Jersey: Pearson, 1997. 436 p.

ESPINOLA, C. R. Material de origem do solo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 59–70., 2017. DOI 10.5935/0100-929X.20170005. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/rig/article/download/29/9/9>. Acesso em 14 de maio de 2024.

EVANS, L. J.; CAMERON, B. H. A chronosequence of soils developed from granitic morainal material, Baffin Island, N.W.T. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 59, n. 2, p. 203–210, 1979.

FAO, F. AND A. O. OF THE U. N. **World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** 2. ed. Rome: FAO, 2015. 203 p. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bcdece7-f45f-4dc5-beb1-97022d29fab4/content>. Acesso em: 14 maio 2024.

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**, v. 42, n. 4, p. 417–424, abr. 1978.

GOYDARAGH, M.G; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R; GOLCHIN, A.; JAFARZADEH, A.A; LADO, M. Predicting weathering indices in soils using FTIR spectra and random forest models. **Catena**, Amsterdam, v. 204, 2021.

GUERRA, A. T. **Recursos naturais do Brasil.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1980. 220 p.

IUSS Working Group WRB. **World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** ed. 4. Viena: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. Disponível em: [https://www.isric.org/sites/default/files/WRB\\_fourth\\_edition\\_2022-12-18.pdf](https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf). Acesso em: 26 maio. 2024

JENNY, H. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology.** 1. ed. New York: Dover Publications, 1994. 320 p.

JUILLERET, J. *et al.* Mind the gap: A classification system for integrating the subsolum into soil surveys. **Geoderma**, Amsterdã, v. 264, p. 332–339, fev. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706115300604>. Acesso em: 14 de maio 2024.

KING, L. C. Canons of landscape evolution. **Geological Society of America Bulleti**, New York, 64. ed., p. 721-752, 1953.

LIMA, É. M.; CORRÊA, A. C. de B.; FONSECA, D. N. Dinâmica geomorfológica quaternária da cimeira estrutural pernambuco-alagoas, planalto da borborema. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 31, p. 142-155, 2016. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/116542>. Acesso em: 3 out. 2023.

LIMA, GLÊVIA KAMILA. **Caracterização de vertissolos do nordeste brasileiro.** Dissertação (Mestrado em Ciências do solo). 2014. 101 p. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2014. Disponível em: [http://ww3.pgs.ufrpe.br/sites/ww2.novoprppg.ufrpe.br/files/documents/glevia\\_kamila\\_lima\\_0.pdf](http://ww3.pgs.ufrpe.br/sites/ww2.novoprppg.ufrpe.br/files/documents/glevia_kamila_lima_0.pdf). Acesso em: 14 de maio 2024.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: uma análise preliminar do contexto nordestino. **Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo**,

v. 12, n. 03 p. 37 - 46, 2012. DOI: 10.20502/rbg.v12i0.257. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/257>. Acesso em: 11 out. 2023.

MAIA, R. P.; BASTOS, F. H.; NASCIMENTO, M. A. L.; LIMA, D. L. S.; CORDEIRO, A. M. N. **Paisagens Graníticas do Nordeste Brasileiro**. 1.ed. Fortaleza: Edições UFC, 2018. 106 p.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R; CLAUDINO-SALES, V. Geomorfologia do nordeste: Concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento nordestinas. **Revista de Geografia**, Recife, v. 27, n. 1, p. 6-19, Set. 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/228857>. Acesso em: 14 maio 2024.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. 276 p.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, Londres, v. 299, n. 5885, p. 715-717, 1982.

OLIVEIRA, A. V. L. C. de. Caracterização dos sistemas ambientais do Rio Grande do Norte: um enfoque na Depressão Sertaneja. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó v. 2, p. 221–231, 2016. DOI: 10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10444. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10444>. Acesso em: 8 out. 2023.

SANTOS, H. G. DOS *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Embrapa: Brasília, 2018. 358 p.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C.; SHIMIZU, S.H. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2015. 102 p.

SANTOS, J. C. B. **Saprolitologia aplicada à gênese e às implicações ambientais de regolitos do Estado de Pernambuco**. 2015. 319 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015a.

Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20102015-140346/pt-br.php>. Acesso em: 2024-05-21.

SCHAFER, W. M.; SINGER, M. J. A New Method of Measuring Shrink-Swell Potential Using Soil Pastes1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, n. 5, p. 805 - 806, 1976.

SCHOENEBERGER, M. *et al.* Branching out: Agroforestry as a Climate Change Mitigation and Adaptation Tool for Agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 67, n. 5, p. 128A-136A, 2012.

SHARMA, A.; RAJAMANI, V. Major Element, REE, and Other Trace Element Behavior in Amphibolite Weathering under Semiarid Conditions in southern India. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 108, n. 4 p. 487–496, 2000.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington, D.C: USDA Handbook 18. Government Printing Office, 2017. 639 p.

SOIL SURVEY STAF. **Keys to Soil Taxonomy**. 11. ed. Washington: United States Department of Agriculture, 2010. 346 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**. 2. ed. Washington D.C: United States Department of Agriculture, 1999. 886 p.

TAYLOR, G.; EGGLETON, R. A. **Regolith Geology and Geomorphology**. 1. ed. New Jersey: Wiley, 2001. 392 p.

TEIXEIRA, P. C. *et al* (org). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 22 maio 2024.

VELDE, B.; MEUNIER, A. **The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks**. 1. ed. Berlin: Springer, 2008. 406 p.

VITTE, Antonio Carlos. Etchplanação dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 105–118, 2005. DOI: 10.7154/RDG.2005.0016.0011. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47290>. Acesso em: 26 maio. 2024.

YOUSEFIFARD, M.; AYOUBI, S.; JALALIAN, A.; KHADIVI, M. Mass balance of major elements in relation to weathering in soils developed on igneous rocks in a semiarid region, northwestern Iran. **Journal of Mountain Science**, Heidelberg, v. 9, n. 1, p. 41-58. 2012. Disponivel em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11629-012-2208-x#citeas>. Acesso em 16 jul. 2023.

WHITE, R. E. **Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource**. 4. ed. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2006. 386 p.