

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Gênese, Classificação e Avaliação da Aptidão
Agrícola de Solos de Natureza Carbonática,
Itaperuna, RJ**

Hugo de Souza Fagundes

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA APTIDÃO
AGRÍCOLA DE SOLOS DE NATUREZA CARBONÁTICA,
ITAPERUNA, RJ**

HUGO DE SOUZA FAGUNDES

Sob a orientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

e Coorientação do Pesquisador
Carlos Roberto Pinheiro Junior

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

Seropédica, RJ
Agosto de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S645g	Fagundes, Hugo de Souza, 1990- Gênese, classificação e avaliação da aptidão agrícola de solos de natureza carbonática, Itaperuna-RJ / Hugo de Souza Fagundes. - Seropédica, 2024. 44 f. : il. Orientador: Marcos Gervasio Pereira. Tese (Doutorado). – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024. 1. Solos carbonáticos. 2. Pedogênese. 3. Intemperismo. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo. III. Título.
-------	---

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Cientista do Nosso Estado – FAPERJ, concedido ao Orientador.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.
--



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 72 / 2024 - CPGACS
(12.28.01.00.00.00.27)**

Nº do Protocolo: 23083.046031/2024-15

Seropédica-RJ, 29 de agosto de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

HUGO DE SOUZA FAGUNDES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/08/2024.

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

(Orientador)

Eduardo Carvalho da Silva Neto. Dr. UFRRJ

Francis Henrique Tenório Firmino. Dr. UFV

(Assinado digitalmente em 29/08/2024 11:30)

EDUARDO CARVALHO DA SILVA NETO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1246489

(Assinado digitalmente em 29/08/2024 12:58)

MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 30/08/2024 10:28)

FRANCIS HENRIQUE TENÓRIO FIRMINO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 094.963.224-41

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **72**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **29/08/2024** e o código de verificação: **010eb1e747**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Rita de Cássia de Souza Fagundes
e Dalvo Fagundes,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas bênçãos concedidas e por Sua constante provisão, guiando-me sempre na jornada em direção à felicidade.

A minha família, com destaque especial para minha querida mãe, Rita, e meu querido pai, Dalvo, merecem meu profundo agradecimento. Sempre contando com o apoio deles, mesmo à distância, pude alcançar meus objetivos com sua valiosa ajuda.

Ao meu amigo e orientador Marcos Gervasio Pereira, expresso minha profunda gratidão por sua orientação, confiança e apoio constante ao longo da minha jornada.

Ao meu amigo e coorientador Carlos Roberto Pinheiro Junior, pela confiança, paciência e ensinamentos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por ter proporcionado os anos mais intensos e enriquecedores até o momento, onde conheci pessoas incríveis e passei por situações que serão para sempre lembradas.

Aos colegas dos laboratórios LGCS, LISA e LIEA que forneceram o material e a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Luize, Lais, Juliano, Felicia, Danilo, Juliana, Emandro e Fabrício cuja amizade transcende a distância, agradeço por estarem sempre ao meu lado, mesmo quando fisicamente distantes.

Aos amigos que fiz durante essa caminhada na rural e que vou levar para toda a vida, que sempre se fizeram presente seja nos momentos de descontração quanto nos momentos de ajuda nos estudos e trabalhos, em especial a Otavio, Yan, Antonino, Higo, André, Marta, Pedro Vaz, Pedro Velasco, João e Robert.

Agradeço a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação que tornou todo meu esforço possível, e ao CNPq por financiar minha bolsa de estudos.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia–Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ) pelo apoio prestado. Agradeço aos secretários, discentes, docentes, colaboradores, orientadores e coordenadores do programa pelo apoio e por tudo que me ensinaram durante minha jornada.

E todos que direta ou indiretamente me ajudaram em minha caminhada, o meu muito obrigado.

RESUMO

FAGUNDES, Hugo de Souza. **Gênese, classificação e avaliação da aptidão agrícola de solos de natureza carbonática, Itaperuna-RJ**. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

As rochas carbonáticas são caracterizadas por possuírem, predominantemente, em sua composição minerais carbonáticos, como calcita (CaCO_3) ou dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O mesmo material de origem, sujeito a diferentes condições de relevo e clima influencia a formação de solos com características distintas. A topografia, que inclui componentes como inclinação, altitude e orientação, afeta a distribuição e quantidade de água que infiltra no solo. Essa relação influencia em classes de solos e aptidão agrícola das terras diferentes. Com isso, o objetivo desse estudo foi caracterizar os atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos de solos em uma topossequência de natureza carbonática, mantendo as condições climáticas e o material de origem constantes, variando apenas a declividade do terreno. A área de estudo está localizada no município de Itaperuna, situado na região Noroeste Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Foram selecionados quatros perfis ao longo de uma topossequência, localizados nas posições de topo (P1), terço superior (P2), terço médio (P3) e terço inferior (P4). Foram coletadas amostras deformadas para análises morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Os perfis foram descritos de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo, classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos e avaliados usando o Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras. Todos os perfis foram classificados como eutróficos, por apresentaram alta saturação por bases, devido a composição do material de origem. Foi observada a presença de cerosidade nos perfis P1, P2 e P3, o que indica a ocorrência de translocação de argila. No perfil P1 a argila é de baixa atividade, enquanto os perfis P3 e P4 têm argila de alta atividade. Os principais processos pedogenéticos específicos identificados foram de elutriação (P1) eluviação e iluviação (P2) e melanização e carbonatação (P3 e P4). A inclinação acentuada é o principal impedimento para a aptidão das terras, resultando em riscos de erosão e limitando o uso de mecanização. A variação dos solos ao longo da topossequência é intrinsicamente ligada ao relevo, que influencia diretamente na drenagem e no escoamento superficial da água. Isso se reflete em diversidade de características morfológica nos perfis, como cor e estrutura.

Palavras-chave: Solos carbonáticos. Pedogênese. Intemperismo.

ABSTRACT

FAGUNDES, Hugo de Souza. **Genesis, classification and evaluation of the agricultural suitability of carbonate soils, Itaperuna - RJ.** 44 p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Carbonate rocks are characterized by having predominantly carbonate minerals in their composition, such as calcite (CaCO_3) or dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). The same parent material, subject to different relief and climate conditions, influences the formation of soils with different characteristics. Topography, which includes features such as slope, altitude, and orientation, affects the distribution and amount of water that infiltrate in the soil. This relationship influences different soil classes and land agricultural suitability. Thus, the objective of this study was to characterize the morphological, physical, chemical and mineralogical attributes of soils in a toposequence of carbonate parent material, keeping the climatic conditions and the source material constant, varying only the slope of the terrain. The study area is located in the municipality of Itaperuna, in the Northwestern region of the state of Rio de Janeiro. Four profiles were selected along a toposequence, located in the top (P1), upper third (P2), middle third (P3) and lower third (P4) positions. Soil samples were collected for morphological, physical, chemical and mineralogical analyses. The profiles were described according to the Manual of Description and Collection of Soil in the Field, classified in the Brazilian System of Soil Classification, and evaluated according to the System of Evaluation of the Land Agricultural Suitability. All profiles were classified as eutrophic as they had high base saturation due to the composition of the source material. The presence of clay skins was observed in the P1, P2 and P3 profiles, which indicates the occurrence of clay translocation. The P1 profile showed a low activity clay, while P3 and P4 had high activity clay. The main specific pedogenetic processes identified were: elutriation, P1; eluviation and illuviation, P2; and melanization and carbonation, P3 and P4. The steep slope was the main impediment to agricultural suitability, resulting in high risks of erosion and limiting the usage of tillage. The variation of soils along the toposequence was intrinsically linked to the relief, which exerts a direct influence on drainage and surface water runoff, which reflected in a diversity of morphological characteristics in the profiles, such as color and structure.

Keywords: Carbonate soils. Pedogenesis. Weathering.

ÍNDICES DE TABELAS

Tabela 1. Informações gerais de Itaperuna-RJ, formação geológica, litologia, clima, vegetação e domínio morfoclimático.....	8
Tabela 2. Informações dos perfis na topossequência; situação na paisagem, altitude, relevo local, declividade e drenagem.....	11
Tabela 3. Atributos morfológicos dos solos de uma topossequência no município de Itaperuna-RJ, profundidade, consistência, cerosidade e transição entre seções.	14
Tabela 4. Atributos morfológicos dos solos de uma topossequência no município de Itaperuna-RJ, profundidade, cor, umidade, estrutura e classe textural.	15
Tabela 5. Atributos físicos dos solos de uma topossequência de natureza carbonática.	18
Tabela 6. Estabilidade de microagregados de solos carbonáticos.	20
Tabela 7. Atributos químicos dos solos de uma topossequência de natureza carbonática.	22
Tabela 8. Carbono orgânico total, substâncias húmicas dos perfis, relação entre ácido fúlvico, ácido húmico e humina.	25
Tabela 9. Classe de aptidão agrícola dos perfis de uma topossequência de natureza carbonática.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização de áreas de rochas carbonáticas no estado do Rio de Janeiro.....	3
Figura 2. Precipitação da calcita. PCO_2 = pressão de gás carbônico; Ca= cálcio; HCO_3^- = carbonato de cálcio. Fonte: elaboração própria.	6
Figura 3. Variação de precipitação e temperatura ao longo do ano no município de Itaperuna-RJ.	9
Figura 4. Vista lateral (a) e mapa de elevação (b) dos perfis na topossequência no município de Itaperuna-RJ. Fonte: Google Earth (a e b); Fotos: Marcos Gervasio Pereira (b).....	10
Figura 5. Difratoograma da fração areia dos perfis 3 e 4. Al=albita, Cl=clorita, Il=ilmenita, Do=dolomita, Qz=quartzo.	27
Figura 6. Difratoograma da fração argila dos perfis 3 e 4. Do=Dolomita, Ka=caulinita.....	29
Figura 7. Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira	31
Figura 8. Luvisolo Crômico Pálido típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.....	32
Figura 9. Chernossolo Argilúvico Órtico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.....	33
Figura 10. Chernossolo Háplico Órtico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Solos de Natureza Carbonática.....	2
2.2 Distribuição de Solos Carbonáticos no Brasil	2
2.3 Rochas Carbonáticas no Estado do Rio de Janeiro.....	3
2.4 Fatores de Formação do Solo e Processos Pedogenéticos.....	3
2.5 Classificação dos Solos e Aptidão Agrícola das Terras	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1 Caracterização da Área de Estudo	8
3.2 Descrição dos Perfis e Coleta de Amostras	11
3.3 Análises Físicas	11
3.4 Análises Químicas	12
3.5 Análises Mineralógicas.....	13
3.6 Classificação dos Solos	13
3.7 Aptidão Agrícola das Terras.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 Atributos Morfológicos	14
4.2 Atributos Físicos.....	18
4.3 Atributos Químicos	21
4.4 Atributos Mineralógicos	26
4.4.1 Mineralogia da fração areia	26
4.4.2 Mineralogia da fração argila.....	28
4.5 Gênese e Classificação dos Solos.....	29
4.8 Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras.....	34
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

A interação entre o material de origem de natureza carbonática e fatores como clima e relevo exerce uma influência significativa na formação dos solos, resultando em características específicas que os diferenciam da maioria dos solos encontrados no Brasil. Em ambientes onde o material parental é rico em carbonato de cálcio e magnésio, como o mármore, em associação com condições climáticas mais secas ou moderadamente úmidas, ocorrem processos pedogenéticos distintos. Entre eles, destacam-se a carbonatação, que envolve a precipitação de carbonatos nos horizontes do solo, e a melanização, que se refere ao escurecimento do solo devido ao acúmulo de matéria orgânica. Esses processos são mais evidentes em relevos acidentados, com boa drenagem, permitindo tanto a acumulação de carbonatos quanto a formação de um horizonte superficial escuro, típico de solos sob influência de vegetação mais densa ou de decomposição lenta de matéria orgânica. Essa combinação de fatores naturais origina solos com propriedades químicas e físicas diferenciadas, com maior presença de nutrientes como cálcio e magnésio, os quais não são comuns nos solos ácidos que predominam em grande parte do território brasileiro.

Outro aspecto relevante é a aptidão agrícola das terras, que, além de levar em consideração as particularidades do solo, avalia aspectos da paisagem e o perfil do agricultor que possa vir a utilizar essas terras, o que pode, por vezes, limitar seu uso para fins agrícolas. Compreender a inter-relação entre esses fatores é essencial, pois essa dinâmica influencia diretamente as classes de solos e suas aptidões agrícolas. A partir do exposto o trabalho apresenta a seguinte hipótese:

O relevo, juntamente com o clima e a composição química do material de origem, exerce influência significativa na diversidade de atributos dos solos, influenciando diretamente o grau de pedogênese e, consequentemente, a aptidão agrícola das terras.

O trabalho teve como objetivo geral ampliar os estudos acadêmicos sobre a formação de solos de natureza carbonática, além de fornecer informações relevantes para a sociedade sobre sua utilização agrícola. Como objetivos específicos, destacam-se:

- a) Caracterizar perfis de solos formados a partir de materiais de natureza carbonática;
- b) Analisar os atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos dos solos formados; e
- c) Classificar os perfis quanto à aptidão para atividades agrícolas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solos de Natureza Carbonática

Solos carbonáticos são aqueles que contêm uma quantidade significativa de carbonatos, principalmente de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3). Esses solos se formam a partir do intemperismo de rochas carbonáticas, como calcário e dolomito, processo intimamente ligado à dissolução gradual dessas rochas ao longo do tempo, frequentemente influenciado pela ação da água. As rochas carbonáticas são compostas principalmente por calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e aragonita (CaCO_3), além de minerais secundários como anidrita, gesso, siderita, quartzo, argilominerais, pirita, óxidos e sulfatos (Tucker & Wright, 1990; Acocella & Turini, 2010).

Embora as rochas carbonáticas sejam predominantemente sedimentares, elas não se restringem apenas a essa categoria, podendo também sofrer transformações e formar rochas metamórficas. O exemplo mais comum é o mármore, resultante do metamorfismo de calcário ou dolomito (Ferreira et al., 2013).

Solos formados a partir dessas rochas frequentemente exibem uma textura mais fina, sendo a textura argilosa a predominante, podem apresentar uma diversidade de cores, porém em função das condições de pH elevado, ausência de Al, e por vezes associado ao baixo conteúdo de matéria orgânica, decorrente das condições climáticas, a hematita é preferencialmente formada, originando solos de matizes mais avermelhados. Normalmente solos formados a partir desse tipo de material de origem apresentam argilas 2:1, o que faz com que as estruturas identificadas, e em especial nos horizontes subsuperficiais, sejam do tipo blocos angulares e/ou prismática. Em função da presença das argilas de alta atividade, tais solos podem apresentar limitações quanto a mecanização, devido a pequena faixa de friabilidade observada. Quanto a fertilidade do solo, pode ser observada em função dos elevados valores de Ca e/ou Mg, a precipitação do P, contribuindo para a redução de sua disponibilidade. Adicionalmente os elevados valores de pH podem levar a precipitação e micronutrientes, e consequentemente redução de sua disponibilidade (Shinzato, 1998; Kämpf e Curi, 2012).

2.2 Distribuição de Solos Carbonáticos no Brasil

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2022), cerca de 71% da superfície da Terra é coberta por água, incluindo água doce e salgada, distribuída entre mares, rios, lagos e no estado sólido em geleiras. Os restantes 29% compõem a crosta terrestre, conhecida como litosfera, composta por rochas, minerais e solos.

Goldscheider et al. (2020), utilizando dados da World Karst Aquifer Map (WoKAM), primeiro banco de dados geográficos global sobre a distribuição das rochas carbonáticas, estudaram a presença de rochas carbonáticas na superfície terrestre. Constataram que 9,4% da superfície global livre de gelo consiste em rochas carbonáticas contínuas, puras em sua composição, enquanto 5,8% são ocupadas por rochas carbonáticas descontínuas ou misturadas com evaporitos, onde os carbonatos se acumulam de forma irregular. Isso representa aproximadamente 15,2% ou cerca de 20,3 milhões de km^2 da superfície terrestre. A maior parte dessas rochas está localizada no continente Asiático, especialmente na China, que abrange aproximadamente 2,5 milhões de km^2 , cerca de 26% de sua área total, enquanto a menor concentração está na América do sul. No Brasil, destacam-se as áreas de rocha carbonáticas, totalizando 312 mil km^2 , aproximadamente 4% de seu território.

Geologicamente, o Brasil possui uma ampla variedade de formações com rochas carbonáticas, conforme destaca o Serviço Geológico do Brasil (2023). Entre as mais notáveis estão a Formação Jandaíra, localizada na Chapada do Apodi (Ceará e Rio Grande do Norte), a Formação Santana, na Chapada do Araripe (Ceará, Pernambuco e Piauí), o Grupo Bambuí

(Tocantins e Goiás), a Serra da Bodoquena no Mato Grosso do Sul, e o Grupo Italva no Rio de Janeiro.

2.3 Rochas Carbonáticas no Estado do Rio de Janeiro

O Grupo Italva é uma formação geológica situada no estado do Rio de Janeiro, composta principalmente por rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore. Os municípios dentro do estado onde se encontram os principais depósitos de rochas carbonáticas são Três Rios, Nova Friburgo, Barra Mansa, Barra do Piraí, Piraí, São Sebastião do Alto, São Fidélis, Macuco, Itaperuna, Italva, Cordeiro, Cantagalo, Cambuci e Bom Jesus do Itabapoana. (CPRM, 2016; Lima, 2011) (Figura 1).

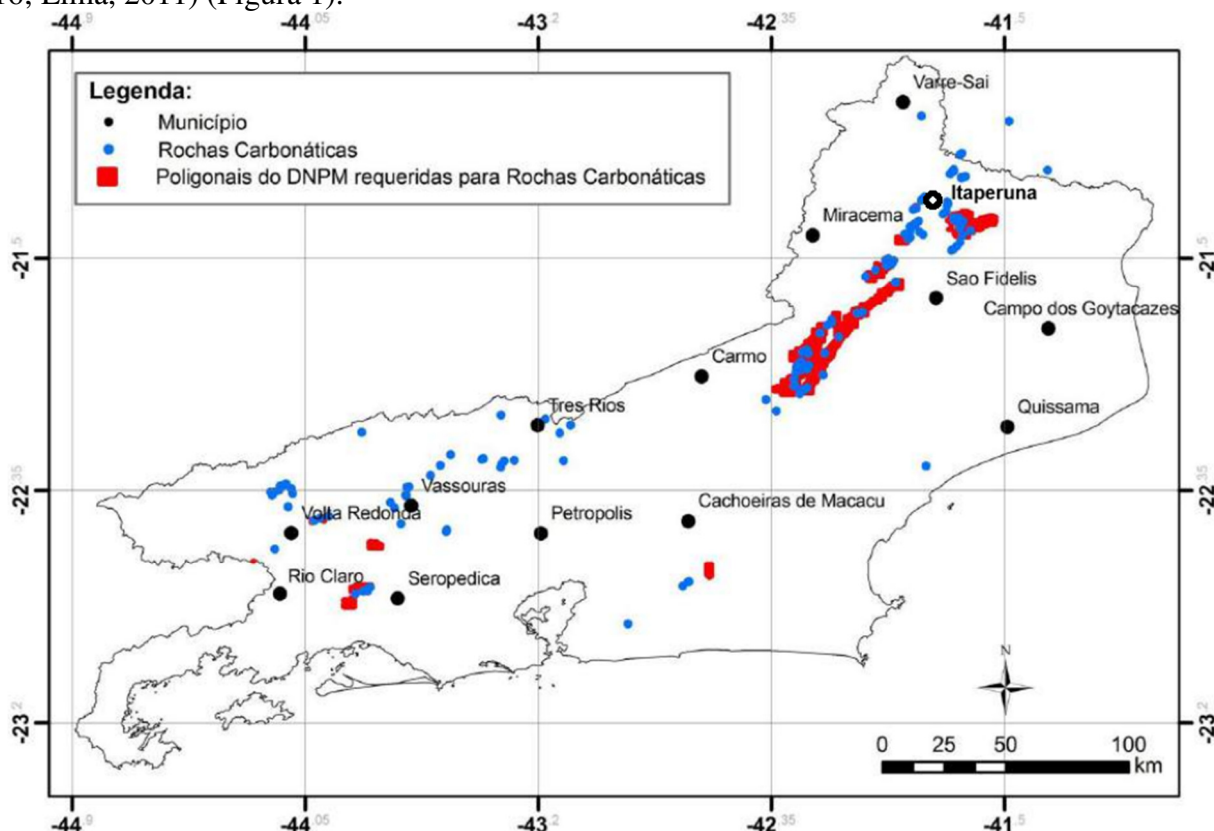


Figura 1. Localização de áreas de rochas carbonáticas no estado do Rio de Janeiro. Fonte: CPRM, adaptado por Hugo Fagundes.

A estratigrafia do Grupo Italva revela uma sequência de camadas rochosas que variam em composição, idade e origem e fornecem informações importantes sobre as condições ambientais passadas e os processos geológicos que ocorreram na região. As rochas do Grupo Italva datam do período Pré-Cambriano, o que significa que elas têm mais de 540 milhões de anos. Esse período é conhecido por ser uma época de formação intensiva de rochas e desenvolvimento inicial da crosta terrestre. Acredita-se que o Grupo Italva se formou em ambiente marinho raso, onde a deposição de carbonatos ocorreu de maneira contínua, permitindo a acumulação de sedimentos carbonáticos ao longo de milhões de anos (Heilbron et al., 2004; Marques, 2009).

2.4 Fatores de Formação do Solo e Processos Pedogenéticos

O desenvolvimento do solo é um processo complexo que envolve interações físicas, químicas e biológicas atuando ao longo de extensos períodos sobre materiais como rochas e

sedimentos. Esses processos são fortemente influenciados pelo relevo e pelas condições climáticas, resultando na diversidade de solos observada na Terra. Através do estudo dos fatores de formação do solo e dos processos pedogenéticos, é possível compreender melhor as variações entre os horizontes de um mesmo solo e entre os solos de uma mesma região. Entre os fatores de formação do solo, o clima e os organismos são considerados fatores ativos, pois agem diretamente sobre o material de origem ao longo do tempo. Em contrapartida, o material de origem é visto como um fator passivo devido à sua resistência às mudanças (Brady e Weil, 2013; Lepsch, 2016).

O termo "material de origem" refere-se à matéria-prima que dá origem ao desenvolvimento do solo, desempenhando um papel significativo na sua formação. Esse material influencia diversos atributos e características do solo, podendo ser categorizado em dois grupos principais: rochas e sedimentos. O mármore pertence ao grupo das rochas e é uma das principais rochas carbonáticas existentes. Ele é classificado como uma rocha metamórfica, originada do calcário que foi submetido a condições de alta temperatura e baixa pressão ao longo do tempo. Dependendo do processo de formação, o mármore pode conter ou não impurezas, o que resulta em diferenças em aspectos como o grau de consolidação, que se refere ao quão coesa a rocha é, podendo variar de altamente consolidada a menos coesa, dependendo da intensidade do metamorfismo, a granulometria, referente a distribuição dos tamanhos dos grãos que a compõem, e a composição mineralógica, referente ao tipo de mineral presente na rocha, onde a impureza é caracterizada pela presença de outros minerais, resultando em diferentes classes de mármore, o que influencia a resposta da rocha ao intemperismo (Hardt, 2004; Lepsch, 2016).

Devido à sua heterogeneidade e à presença de impurezas, o intemperismo do mármore pode levar à formação de solos com características distintas, mas que compartilham algumas particularidades, como: pouca profundidade de solum (A+B), eutróficos, alta saturação por bases com alto teor de Ca e Mg, argila de alta atividade (CTC maior ou igual a $27 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) e altos valores da relação sílica/alumínio (ki), além de apresentar boas condições de drenagem devido a porosidade da rocha (Shinzato, 1998; Hardt, 2004).

O relevo é um importante fator na formação do solo, dividido por porções menores conhecidas como microrelevo, que configuram a superfície do terreno com formas que podem ser convexas, retilíneas e côncavas. Segundo Ruhe (1960), o perfil de uma vertente é caracterizado por cinco porções: o topo, que é a porção convexa ou relativamente plana na parte mais elevada e funciona como divisor de águas; o ombro, porção convexa, situada entre o topo e a encosta, é uma zona transicional e erosional; a encosta, que vai do ombro ao sopé, apresenta declives mais acentuados na paisagem e pode ser subdivida em encosta superior, média e inferior, sendo também um segmento erosional; o sopé ou sopé coluvial, localizado entre a encosta e o sopé colúvio-aluvial, possui concavidade e declividade decrescente, representando um segmento erosional-deposicional; e o sopé colúvio-aluvial, localizado entre o sopé e o canal de drenagem, relativamente plano e formando a planície de inundação, um segmento deposicional.

A configuração do relevo, chamada de pedoforma, influencia diretamente a exposição do material de origem e a direção do fluxo da água no perfil do solo, podendo alterar os atributos físicos e químicos do solo. Naturalmente, a água flui das áreas mais altas para as mais baixas, seguindo as linhas de contorno do terreno. Em áreas com relevo mais aplanado ou suavemente ondulado, os fluxos hídricos e de energia no interior do perfil do solo são mais favorecidos devido à maior taxa de infiltração da água. Isso resulta em menor escoamento superficial e, conseqüentemente, em uma menor taxa de intemperismo químico, processo que é essencial na formação de solos. Por outro lado, em áreas de relevo mais íngreme, os solos estão sujeitos a uma exposição mais rápida devido à maior taxa de escoamento superficial da água, o que pode intensificar os processos erosivos e o intemperismo físico. A dinâmica da água nessas áreas

pode resultar em uma evolução mais acelerada dos solos, com processos de formação ocorrendo em um tempo mais curto em comparação com áreas de relevo mais suave. Com essa variação do relevo, uma topossequência pode gerar diferentes tipos de solo sob a mesma condição climática e partindo do mesmo material de origem (Artur et al., 2014; Oliveira, João, 2014; Pereira et al., 2019).

O clima é outro fator importante na formação de solos carbonáticos, atuando principalmente por meio da precipitação e da temperatura. Esse fator não apenas determina o tipo de vegetação presente em uma região, mas também influencia os processos geomorfológicos que moldam a paisagem, como a erosão e a deposição de materiais. A influência do clima é tão significativa que uma mesma rocha pode originar solos completamente diferentes sob diferentes condições climáticas, da mesma forma que, rochas distintas podem gerar solos semelhantes quando expostas às mesmas condições climáticas por um longo período. A água é um dos principais agentes na formação do solo, atuando nos processos de intemperismo, como a hidrólise, além de participar na adição, remoção e translocação de materiais no perfil do solo. Regiões com altas temperaturas e precipitação abundante, favorecem as transformações das rochas e promovem o desenvolvimento de cobertura vegetal mais densa. Isso por sua vez, afeta o ciclo da matéria orgânica no solo, acelerando sua decomposição e aumentando a atividade biológica, o que resulta em uma maior produção de CO₂ (Kämpf e Curi, 2012; Meireles et al., 2012; Pereira et al., 2019).

Os organismos, que incluem microrganismos (microflora e microfauna), plantas superiores (macroflora), animais (macrofauna) e o ser humano, exercem uma grande influência na formação e diferenciação dos perfis do solo. A formação inicial do perfil do solo pode ocorrer devido à ação dos organismos, como a colonização de líquens e musgos nas rochas, que extraem elementos e provocam alterações que servem de substrato para colonizadores subsequentes, até que o material seja capaz de sustentar plantas superiores. A matéria orgânica adicionada ao solo por essas plantas, em conjunto com sua decomposição pela fauna do solo, participa de diversos processos, influenciando a estrutura do solo através da agregação das partículas e aumentando a infiltração da água devido ao aumento da porosidade. Essa matéria orgânica pode se acumular na superfície do solo, e sua decomposição provoca uma série de modificações no horizonte superficial, como o aumento da capacidade de troca catiônica e escurecimento do horizonte (Lepsch, 2016; Pereira et al., 2019).

A interação dos fatores de formação do solo desencadeia uma série de processos, tanto múltiplos quanto específicos, cuja ações se refletem nas características morfológicas e na composição do solo. A intensidade variada desses processos é crucial para a formação de horizontes distintos no solo, resultando na diversidade de tipos de solo em uma paisagem. O conceito desses processos, assim como sua identificação, é importante para organização e classificação de solo (Sokolov, 1996).

Simonson (1959) propôs que o solo é dinamicamente alterado *in situ* por meio dos processos múltiplos de adição, perda, transformação e translocação de materiais, cuja intensidade varia conforme a profundidade em relação a superfície e as combinações de fatores ambientais locais. A adição refere-se à entrada de materiais do meio externo para o perfil do solo, podendo ocorrer na superfície, subsuperfície ou lateralmente ao perfil. A perda ocorre quando materiais são removidos do perfil para o meio externo, através de processos como erosão superficial, lateralização de colóides ou drenagem do lençol freático na subsuperfície. A transformação envolve alterações físicas e/ou químicas nos materiais que compõem o perfil do solo, exemplificado pelo intemperismo que reduz partículas e forma novos minerais. A translocação refere-se ao deslocamento de materiais dentro do perfil do solo, sem perda para o meio externo, sendo comumente observada com argilas e matéria orgânica.

A interpretação das diferentes características do solo permite identificar os tipos específicos de processos pedogenéticos (PPEs) que estão ocorrendo no perfil, assim como

distinguir os diferentes tipos de solo. Os PPEs são designados por termos que descrevem as características ou mecanismos presentes no solo. Entre os principais PPEs estão a melanização, leucinização, paludização, pedalização, silicificação, ferralitização, plintização, lessivagem (eluviação/iluviação), elutriação, podzolização, gleização, salinização, sodificação, ferrólise, carbonatação (calcificação), sulfurização (tiomorfismo) e pedoturbação. Esses processos resultam da interação de um ou mais processos pedogenéticos que atuam de forma mútua no solo (Lepsch, 2021).

A carbonatação ou calcificação é um processo específico que ocorre em solos de natureza carbonática, predominantemente através do processo de translocação, resultando na formação e acúmulo de calcita no solo. Embora o termo também se refira à formação e acúmulo de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), esta ocorrência não é registrada em solos brasileiros, limitando assim a descrição do processo aos carbonatos de cálcio. O processo pode ocorrer por duas vias distintas de formação, em solos bem drenados ou mal drenados, ambos influenciados pela pressão de gás carbônico presente no sistema (Kämpf e Curi, 2012) (Figura 2).

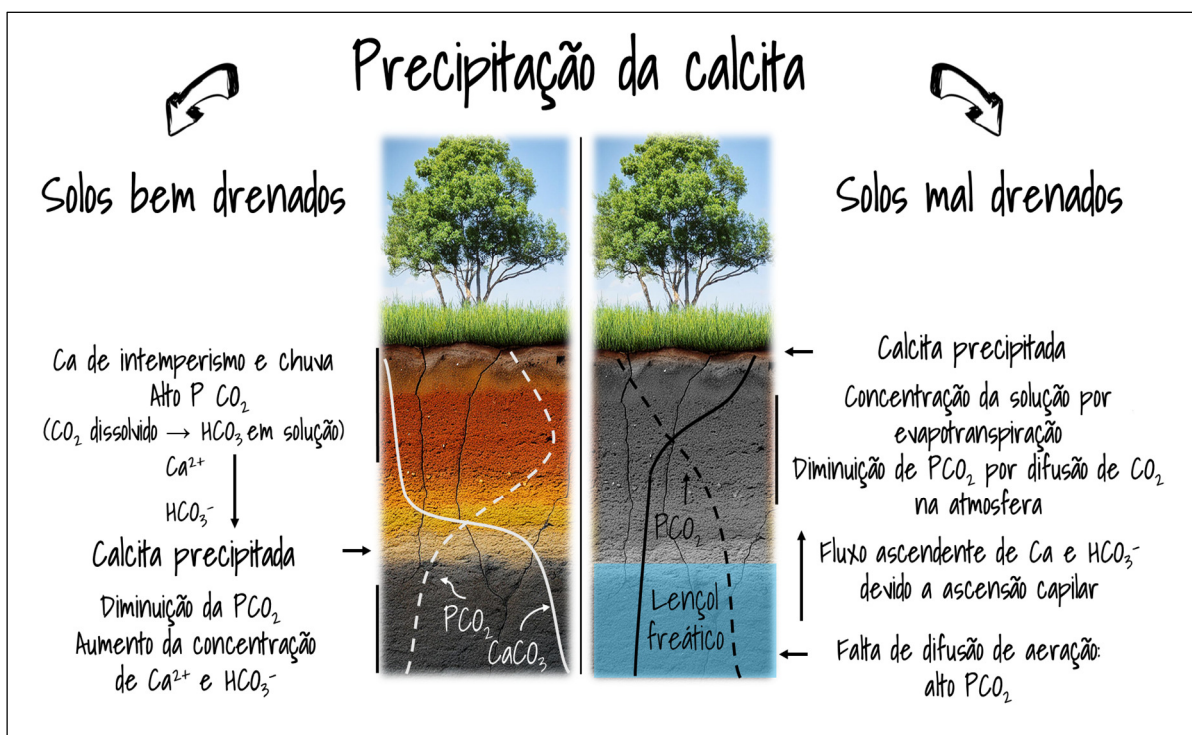


Figura 2. Precipitação da calcita. P_{CO_2} = pressão de gás carbônico; Ca= cálcio; HCO_3^- = carbonato de cálcio. Fonte: elaboração própria.

Além da carbonatação, esses solos, sob certas condições de relevo e clima, podem apresentar processos específicos mais evidentes e com maior probabilidade de ocorrência, relacionados tanto à argila quanto à matéria orgânica. Um desses processos é a melanização, caracterizado pelo escurecimento do material mineral do solo devido à mistura com material orgânico e húmus, principalmente através dos processos de adição, que incorpora matéria orgânica ao solo, transformação, decomposição da matéria orgânica, e translocação, podendo alcançar horizontes subsuperficiais e escurecê-los. Os compostos húmicos revestem a superfície dos grãos minerais do solo, conferindo-lhes uma cor escura, sendo que o grau de melanização ou intensidade da cor depende da taxa de humificação da matéria orgânica e do tipo de compostos produzidos (Kämpf e Curi, 2012; Santos et al., 2013).

Relacionados à argila, diferentes condições de relevo podem desencadear os processos de lessivagem ou elutriação. A lessivagem se refere ao movimento de partículas no interior do

solo, caracterizado pelos subprocessos de eluviação e iluviação. Na eluviação, ocorre a migração de partículas finas (como argila) dos horizontes superficiais (eluviais) para os horizontes subsuperficiais (iluviais), resultando em um horizonte subsuperficial com acúmulo de argila, predominantemente através do processo de translocação. A elutriação, caracterizado pelo processo de perda, desencadeia um subprocesso de erosão no solo, que remove material fino, como argila e silte mais fino, das camadas mais superficiais do solo, resultando na formação de um subhorizonte com acúmulo de argila (Kämpf e Curi, 2012; Santos et al., 2013).

2.5 Classificação dos Solos e Aptidão Agrícola das Terras

A classificação de solos é o processo de organizar os solos em categorias ou classes com base em suas características. No Brasil, esse processo se dá por meio de um sistema oficial, que reflete as condições geográficas e pedológicas do país: o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Por ser taxonômico, hierárquico, multicategórico e aberto, o SiBCS considera fatores ambientais importantes, como clima, vegetação, relevo, material de origem, condições hídricas e as interações solo-paisagem no local do perfil. Esse sistema visa a classificação precisa e adaptada às características únicas dos solos brasileiros (Santos et al., 2018).

Outro sistema relevante no Brasil é o Sistema de Avaliação e Aptidão Agrícola das Terras (SAAAT), que tem como finalidade avaliar a capacidade do solo de sustentar diferentes usos agrícolas. Esse sistema considera uma série de características do solo, do clima e do relevo para determinar a adequação de uma área para agricultura. O processo envolve a análise de fatores como textura do solo, profundidade, drenagem, fertilidade, além de condições climáticas e topográficas (Ramalho Filho e Beek, 1995).

O SiBCS e o SAAAT desempenham papéis complementares e essenciais na análise e manejo de solos carbonáticos, que possuem características específicas devido ao seu conteúdo de carbonatos, como calcita e dolomita. O SiBCS oferece uma estrutura detalhada e rigorosa para classificar os solos carbonáticos com base em suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. No caso desses solos, o teor de carbonatos influencia significativamente o pH, a estrutura do solo, a retenção de nutrientes e a fertilidade. O SiBCS permite identificar e categorizar adequadamente essas particularidades, fornecendo uma classificação que reflete as interações entre o solo e o ambiente local, como o clima, a vegetação e o relevo. O SAAAT, por sua vez, complementa o SiBCS ao avaliar a aptidão agrícola dos solos carbonáticos de maneira sustentável. Devido às suas características químicas específicas, esses solos podem exigir manejos especiais. O SAAAT considera fatores como textura, profundidade, drenagem, relevo e as condições climáticas para determinar o uso mais adequado do solo (Ramalho Filho e Beek, 1995; Santos et al., 2018).

O SiBCS permite distinguir diferentes tipos de solos carbonáticos, facilitando a adoção de práticas de manejo e intervenções agrícolas adequadas para cada tipo, levando em conta suas limitações e potencialidades. O SAAT avalia essas condições e orienta sobre as culturas mais indicadas, se o solo é mais adequado para pastagem ou se possui limitações severas para o uso agrícola. Além disso, o sistema considera a potencial erosão, especialmente em áreas de relevo acentuado, onde a declividade pode aumentar a perda de solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está situada às margens da Rodovia RJ-186, no lado direito, dentro dos limites do município de Itaperuna, que faz parte da região Noroeste Fluminense do estado do Rio de Janeiro. A formação geológica da região pertence ao Grupo Italva, o qual é constituído por um complexo metavulcano-sedimentar, enriquecido com mármore e anfibolitos (Nogueira et al., 2012). Quanto ao relevo, conforme delineado por Ab'Saber (1996), a localidade se insere no contexto geográfico dos Mares de Morros. Esse termo é empregado para descrever as características superficiais e visíveis do relevo, evidenciando a presença de morros arredondados ou mamelonares. Essa morfologia é resultando de processos de dobramentos que datam da era Pré-Cambriana, que ao longo do tempo foi significativamente transformado por forças endógenas e exógenas. Na Tabela 1 são apresentadas algumas informações da área de estudo e localização dos perfis.

Tabela 1. Informações gerais de Itaperuna-RJ, formação geológica, litologia, clima, vegetação e domínio morfoclimático.

Perfil	Município /Estado	Coordenada geográfica	Formação geológica	Litologia	Domínio morfoclimático	Vegetação/ Clima
P1	Itaperuna-RJ	21°17'24" S 41°48'13" O	Grupo Italva	Mármore	Mares de morros	Floresta tropical caducifólia/ Aw
P2		21°17'24.33" S 41°48'12.96" O				
P3		21°17'24.60" S 41°48'12.98" O				
P4		21°17'25" S 41°48'13" O				

O clima da região é categorizado como Aw, de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. Isso se traduz em um clima tropical quente e úmido, onde se destacam uma estação chuvosa durante o verão, que se estende de novembro a abril e uma estação seca durante o inverno, correspondendo ao intervalo de maio a outubro. A temperatura média em Itaperuna é de 23,1°C, com precipitação total de aproximadamente 1.225 mm por ano. Nos meses de junho e julho, caracterizado por estiagem prolongada, a média de chuvas não ultrapassa os 50 mm (Clima tempo, 2023) (Figura 2). A vegetação predominante é a Floresta Tropical Caducifólia, caracterizada queda das folhas durante a estação seca, refletindo as condições de baixa precipitação pluviométrica (IBGE, 2023).

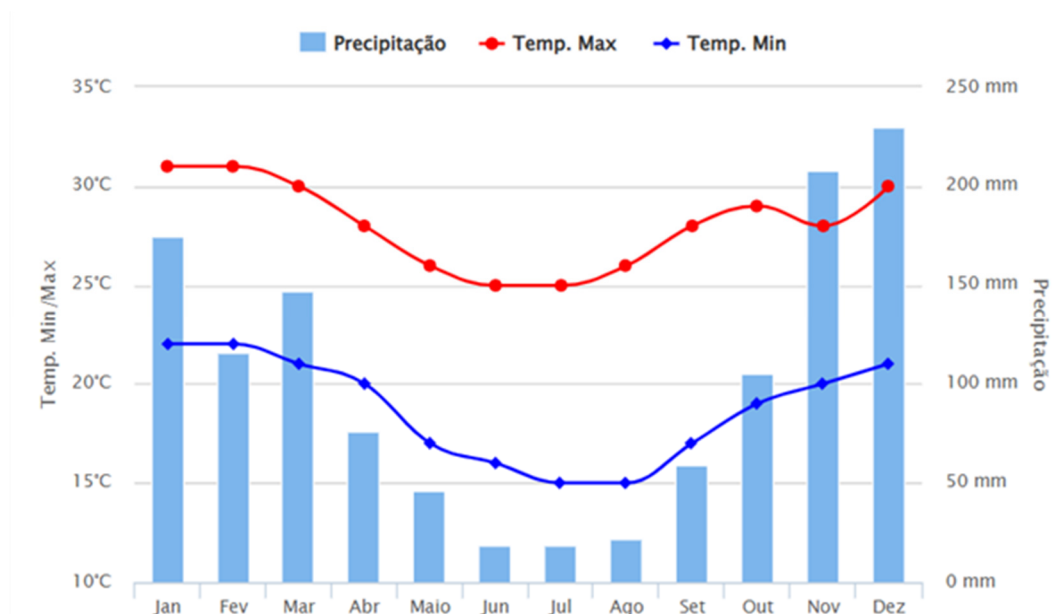
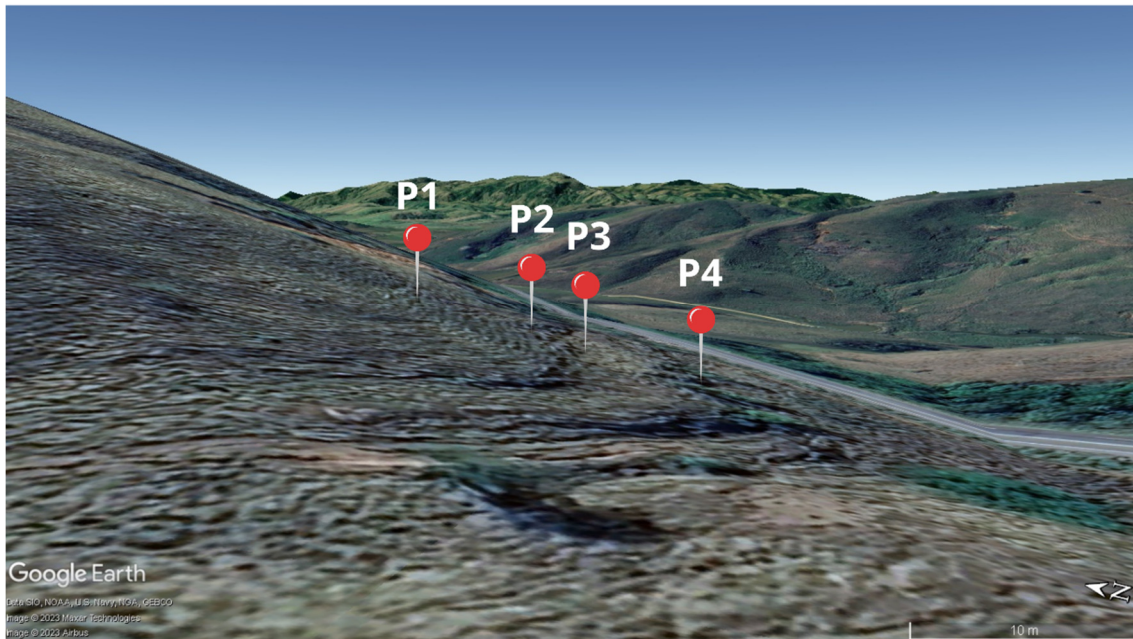


Figura 3. Variação média anual de precipitação e temperatura nos últimos 30 anos no município de Itaperuna-RJ. Fonte: www.climatempo.com.br

Para esse estudo foi selecionada uma topossequência na qual foram abertas trincheiras nas posições de topo (P1), terço superior (P2), terço médio (P3) e terço inferior (P4). A distância horizontal entre os perfis P1 e P4 corresponde a 43,5 m. Além disso, há uma variação de altitude de 6 m entre esses dois pontos. O perfil P1 está situado a uma altitude de 163 m, P2 encontra-se a 161 m, enquanto os perfis P3 e P4 estão a 160 m e 157 m, respectivamente, em relação ao nível do mar (Figura 3).

(a)



(b)

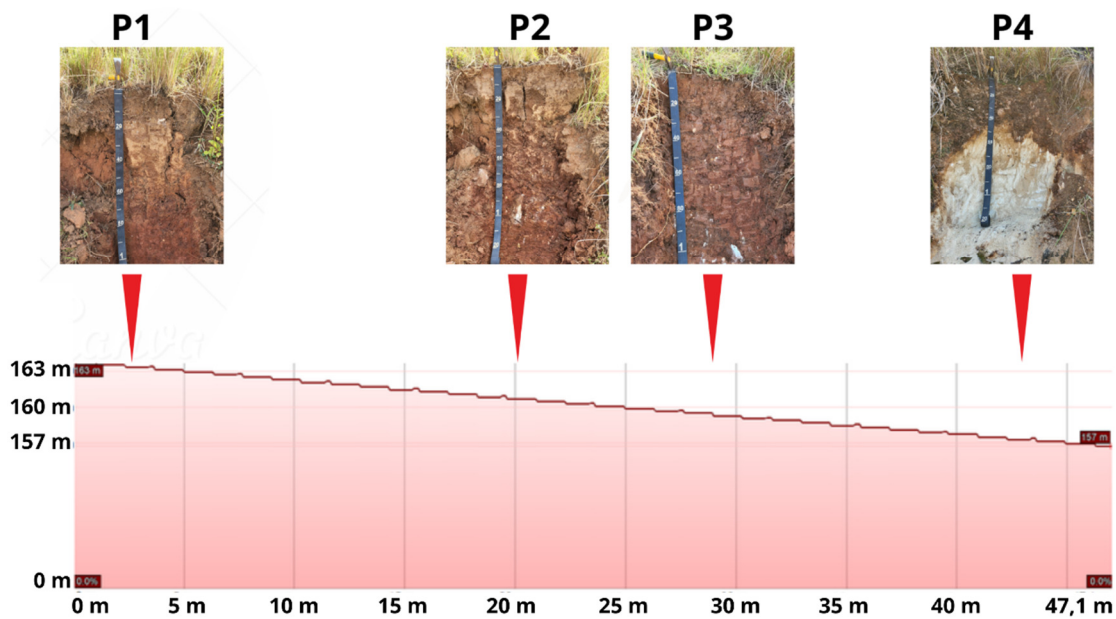


Figura 4. Vista lateral (a) e mapa de elevação (b) dos perfis na topossequência no município de Itaperuna-RJ. Fonte: Google Earth (a e b); Fotos: Marcos Gervasio Pereira (b).

O perfil P1 está localizado em situação de topo na paisagem, com 35% de declive e o perfil P2 se encontra no terço superior da paisagem, com 40% de declive. Ambos os perfis são caracterizados por localizarem-se em áreas de relevo forte ondulado. Já os perfis P3 e P4 estão no terço médio e no terço inferior da paisagem, respectivamente, em pontos da paisagem com 14 e 18% de declive, caracterizando um relevo ondulado (Tabela 2). Em relação as condições de drenagem, todos os perfis são bem drenados. Anjos et al. (1998) e Pereira et al. (2019), entre

outros autores, relatam o papel fundamental do relevo nos atributos do solo, devido a sua influência na dinâmica da água, como a drenagem interna do perfil. A dinâmica da água regula a intensidade das reações químicas, desempenhando um papel significativo no intemperismo. Adicionalmente, esse fator favorece o transporte de partículas sólidas e materiais dissolvidos, resultando em efeitos que se manifestam na formação de diferentes tipos de solo, conforme sua posição geográfica, como observado por Oliveira (2014) em seu estudo sobre a influência do relevo na formação de solos.

Tabela 2. Informações dos perfis na topossequência; situação na paisagem, altitude, relevo local, declividade e drenagem.

Perfil	Situação paisagem/ altitude	Relevo local	Declividade	Drenagem
P1	Topo/ 163m	Forte ondulado	35%	Bem drenado
P2	Terço superior/ 161m	Forte ondulado	40%	Bem drenado
P3	Terço médio/ 160m	Ondulado	14%	Bem drenado
P4	Terço inferior/ 157m	Ondulado	18%	Bem drenado

3.2 Descrição dos Perfis e Coleta de Amostras

A descrição morfológica dos perfis seguiu os protocolos no Manual de Descrição de Solo no Campo (Santos et al., 2015). Adicionalmente, conduziu-se o teste de efervescência de carbonatos, usando ácido clorídrico (HCl) a 10% em todos os perfis. Em sequência, foram coletadas amostras deformadas dos horizontes dos perfis para análises laboratoriais.

As amostras foram dispostas em bancada, para secagem ao ar, destorroadas e passadas por peneiras de 2 mm. Com esse procedimento foi obtida a fração de terra fica seca ao ar (TFSA), utilizada para as análises mineralógicas, físicas e químicas.

3.3 Análises Físicas

a) análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada com o emprego do método da pipeta, proposto por Day (1965). As amostras de terra foram dispersas utilizando uma solução de hexametáfosfato de sódio e agitadas a baixa velocidade por 16 horas. A determinação dos teores de argila total foi realizada através da extração de uma alíquota da suspensão, levando em consideração a velocidade de sedimentação das partículas, viscosidade do líquido e a temperatura do ambiente. As frações de areia grossa e areia fina foram separadas por tamisação, utilizando peneiras de malhas 0,2 mm e 0,053 mm, respectivamente. Os teores de silte foram calculados por diferença, utilizando a seguinte equação: $\text{Silte (g kg}^{-1}\text{)} = 1000 - (\text{areia total} + \text{argila total})$ (Eq.1)

No caso da argila dispersa em água (argila natural), o método foi semelhante ao usado para a argila total, porém apenas com água destilada como dispersante. Com base nos resultados obtidos, foram calculados o grau de floculação, bem como as relações silte/argila e areia fina/areia grossa.

b) estabilidade de microagregados

Para a avaliação da estabilidade de microagregados, três classes de argila foram quantificados conforme o método proposto por Melo et al. (2019), com adaptações em Melo et al. (2021), a saber: argila dispersível em água (ADA), classe de argila que é mecanicamente desagregável em água e não flocula em suspensão; argila refloculável em água (ARA), classe de argila mecanicamente desagregável e flocula em suspensão; e argila não dispersível em água (AND), classe de argila que não é mecanicamente desagregável. Para calcular o conteúdo de argila não dispersível, o conteúdo de argila total precisa ser conhecido. As classes foram calculadas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$\begin{aligned} 1. ADA (\%) &= \frac{Mada \times VOLrecip \times 100}{VOLaliq \times Mam (105^{\circ}C)} \\ 2. ARA (\%) &= \left[\frac{(Mada + ara) \times Diluição \times VOLrecip \times 100}{VOLaliq \times Mam(105^{\circ}C)} \right] - ADA \\ 3. AND (\%) &= AT - ADA - ARA \end{aligned}$$

Em que: ADA: argila dispersível em água (%); Mada: massa da argila dispersível em água na alíquota extraída (g); VOLrecip: volume final da suspensão ADA; VOLaliq: volume da alíquota extraída de cada suspensão (10mL); Mam (105°C): massa da amostra corrigida quanto à umidade (g); ARA: argila refloculável em água (%); Mada+ara: massa de ADA mais ARA na alíquota extraída (da suspensão diluída) (g); Diluição: diluição aplicada na suspensão de ADA (10 vezes); AND: argila não dispersível em água (%); AT= argila total (%).

3.4 Análises Químicas

As análises químicas do solo seguiram método em Teixeira et al. (2017), e são apresentadas resumidamente a seguir:

4) pH em água e em KCl 1 mol L⁻¹

Determinado potenciometricamente na suspensão solo-líquido de 1:2,5, com tempo de contato não inferior a uma hora e agitação da suspensão antes da leitura.

b) Teores de Ca, Mg e Al

Extraídos com solução de KCl 1mol L⁻¹ (1:10), os elementos Ca e Mg foram quantificados utilizando o princípio da complexometria, na presença de um coquetel tampão, seguido por titulação com uma solução de EDTA 0,0125 mol L⁻¹. Para o Ca, foi utilizada uma solução de KOH 10%, sendo a quantificação realizada similar ao Ca+Mg. No caso do Al, a titulação foi realizada utilizando solução de NaOH.

c) Teores de Na e K

Extraídos com solução duplo ácido (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), na proporção solo-solução 1:10 e determinados por fotometria de chama.

d) Teores de H+Al

Extraídos com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, ajustada a pH 7,0 na proporção de 1:15 e quantificado por titulação com NaOH.

e) Fósforo extraído com solução HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹

Extraídos com solução duplo ácido (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), na proporção solo-solução 1:10 e determinado por colorimetria após a redução do complexo fosfomolibídico com ácido ascórbico, em presença de sal de bismuto.

f) Fósforo extraído com solução de Olsen

Extraído com solução de NaHCO₃ a pH 8,5. A extração foi realizada com 2,5 cm³ de terra e 50 mL de solução de NaHCO₃ a pH 8,5 por trinta minuto e determinado por colorimetria após a redução do complexo fosfomolibídico com ácido ascórbico, em presença de sal de bismuto.

g) Carbono orgânico total (COT)

As amostras foram maceradas e passadas por peneiras de malha de 60 mesh. A determinação do teor de carbono orgânico total foi conduzida seguindo o método de Yeomans e Bremner (1988). Nesse procedimento, utilizou-se uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) com concentração de $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ como agente oxidante em meio ácido. O excesso de dicromato foi titulado utilizando uma solução de sulfato ferroso amoniacal com concentração de $0,20 \text{ mol L}^{-1}$, na presença do indicador ferroin.

h) $CaCO_3$ Equivalente

A determinação dos teores de carbonato de cálcio equivalente foi realizada através da pesagem de 2,5 g de TFSA, a qual foi então transferida para 13rlenmeyer de 250 mL e adicionados 50 mL de uma solução de HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. A amostra foi aquecida a 170°C por um período de 30 minutos. Posteriormente, o frasco foi resfriado e o conteúdo filtrado. Em seguida, foram introduzidas três gotas do indicador fenolftaleína, e o excesso de ácido foi neutralizado através da adição de uma solução de NaOH $0,25 \text{ mol L}^{-1}$. O processo de titulação foi realizado para determinar a quantidade excedente de ácido presente na amostra.

g) Fracionamento das substâncias húmicas

Para o fracionamento das substâncias húmicas a extração foi realizada segundo a Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS), Swift (1996), obtendo-se assim as frações ácido húmico, ácido fúlvico e humina e as relações das frações ácido húmico / ácido fúlvico; extrato alcalino (C- EA) / humina, sendo (C- EA= ácido fúlvico + ácido húmico) (Benitez et al., 2003).

A partir dos resultados foram calculados: o $\Delta p\text{H}$, a soma de bases (S), a capacidade de troca catiônica do solo (valor T), a saturação por bases (V%) e a atividade da fração argila, como descrito por Santos et al (2018).

3.5 Análises Mineralógicas

A composição mineral das frações areia e argila foi determinada por difração de raios X em pó utilizando um difratômetro analítico Pan X'PERT PRO utilizando radiação Co $K\alpha$ (40 kV, 30 mA), na faixa de $4-70^\circ 2\theta$ a $0,02^\circ 2\theta$ incremento por minuto. Os padrões de DRX da fração argila foram obtidos com placas orientadas. Os minerais foram identificados com base em dados de difração relatados por Brown e Brindley (1980). O termo “material 2:1” foi usado de forma geral, para todas as argilas que consistiam em duas lâminas tetraédricas e uma octaédrica, não sendo identificadas com precisão.

3.6 Classificação dos Solos

Com base nos atributos morfológicos, físicos e químicos, os perfis foram classificados até o quarto nível categórico, seguindo as diretrizes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

3.7 Aptidão Agrícola das Terras

Com base na avaliação dos atributos morfológicos, físicos e químicos, bem como outras informações sobre a área, incluindo paisagem, declividade, vegetação, clima e drenagem, além de levar em conta o nível tecnológico do produtor agrícola, os solos foram avaliados conforme as diretrizes estabelecidas pelo Sistema de Avaliação Agrícola das Terras (Ramalho Filho e Beek, 1995).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos Morfológicos

Os atributos morfológicos dos solos são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Quanto a profundidade efetiva, os solos foram classificados como profundos, com espessura variando entre 120cm⁺ (P4) a 145cm⁺ (P2). Em P1 e P2 foram observadas as sequências de horizontes A, AB, BA, B1, B2 e B3; A, BA, B1, B2, B3 e B4, respectivamente. No P3 foi observada a sequência A, AB, B1, B2, BC e C. Estes solos apresentam um horizonte subsuperficial B (BA+B+BC) bem desenvolvido, com espessura começando a uma profundidade de menos de 30cm e estendendo-se a mais de 100 cm abaixo da superfície do solo. No P4, a menor espessura total do solo foi verificada. No entanto, destaca-se o horizonte superficial mais espesso (62 cm), a ausência de um horizonte subsuperficial B, apresentando sequência A1, A2, C1 e C2. Em todos os perfis foi verificada transição clara, sendo que em P1 e P2 também foi observado a transição gradual e em P4 a transição abrupta. Em P1, P2 e P3 a transição foi caracterizada como plana. Já em P4, além da transição plana, foi verificada a ocorrência de transição ondulada.

Tabela 3: Atributos morfológicos dos solos de uma topossequência no município de Itaperuna-RJ, profundidade, consistência, cerosidade e transição entre seções.

Hor	Prof	Consistência			Cerosidade	Transição
	Cm	Seca	Úmida	Molhada		
Perfil 1						
A	0-14	LD	Fr	Pl e Lpe		clara e plana
AB	14-25	D	Fr	Pl e Pe		clara e plana
BA	25-43	D	Fr	MPl e Mpe		clara e plana
Bt1	43-70	D	Fr	MPl e Mpe		gradual e plana
Bt2	70-97	D	Fi	MPl e Mpe	abundante e moderada	gradual e plana
Bt3	97-130+	LD	Fr	MPl e Mpe	abundante e moderada	
Perfil 2						
A	0-21	D	Fi	LPl e Lpe		clara e plana
BA	21-38	MD	Fr	Pl e Pe		clara e plana
Bt1	38-57	D	Fr	MPl e Mpe	comum e moderada	gradual e plana
Bt2	57-86	LD	Fr	MPl e Mpe	abundante e moderada	gradual e plana
Bt3	86-112	D	Fr	MPl e Mpe	abundante e moderada	gradual e plana
Bt4	112-145	D	Fr	MPl e Mpe	abundante e forte	
Perfil 3						
A	0-16	D	Fr	Pl e Pe		clara e plana
AB	16-28	MD	Fi	MPl e Pe		clara e plana
Bt1	28-60	ED	Fi	MPl e Mpe	comum e fraca	clara e plana
Bt2	60-100	ED	Fr	MPl e Mpe	comum e moderada	clara e plana
BC	100-121	ED	Mfi	Pl e Pe		clara e plana
C	121-140+	M	MFr	LPl e Npe		
Perfil 4						
A1	0-21	MD	Fi	Pl e Pe		clara e plana
A2	21-45(43-62)	MD	Fr	Pl e Pe		abrupta e ondulada
C1	45-86	S	S	NPl e Npe		clara e plana
C2	86-120+	S	S	NPl e Npe		

Legenda: Hor: horizonte; LD: ligeiramente dura; D: dura; MD: muito dura; ED: extremamente dura; M: macia; S: solta; Fr: friável; Fi: firme; MFi: muito firme; MFr: muito friável; Pl: plástica; Pe: pegajosa; MPl: muito plástica; MPe: muito pegajosa; LPl: ligeiramente plástica; LPe: ligeiramente pegajosa; NPl: não plástica; NPe: não pegajosa.

Tabela 4. Atributos morfológicos dos solos de uma topossequência no município de Itaperuna-RJ, profundidade, cor, umidade, estrutura e classe textural.

Hor	Prof	Cor úmida	Estrutura	Classe textural
	Cm	Matiz		
Perfil 1				
A	0-14	7,5YR 3/2	fr a mo, pq, gr	francossiltosa
AB	14-25	5YR 3/3	mo, pq, bs c mo, pq, gr	francoarenosa
BA	25-43	5YR 3/4	mo, pq, ba c mo, pq, bs	franco-argiloarenosa
Bt1	43-70	5YR 4/6	mo a fo, md, ba	argiloarenosa
Bt2	70-97	5YR 4/6	fo, gd, pr c fo, pq, ba	argila
Bt3	97-130 ⁺	2,5YR 4/6	fo, pq, ba c fo, pq, bs	argila
Perfil 2				
A	0-21	7,5YR 3/2	mo, mp a pq, bs c mo, pq, gr	argiloarenosa
BA	21-38	5YR 3/3	mo, pq, ba c mo, pq, bs	argiloarenosa
Bt1	38-57	5YR 3/4	fo, gd a mg, pr c fo, pq, ba c fo, pq, bs	argiloarenosa
Bt2	57-86	5YR 4/6	fo, gr, pr c fo, pq, ba c fo, pq, bs	muito argilosa
Bt3	86-112	5YR 4/6	fo, pq, ba c fo, pq, bs	argila
Bt4	112-145 ⁺	2,5YR 4/6	fo, pq, ba c fo, pq, bs	muito argilosa
PERFIL 3				
A	0-16	5YR 3/2	fo, pq, ba c fo, pq, gr	franco-argiloarenosa
AB	16-28	5YR 3/2	fo, pq, ba c fo, pq, gr	franco-argiloarenosa
Bt1	28-60	2,5YR 4/4	fo, pq, bs c fo, pq, ba	argiloarenosa
Bt2	60-100	2,5YR 4/6	fo, pq, bs c fo, pq, ba	argiloarenosa
BC	100-121 ⁺	2,5YR 5/4	mo, pq, ba	francoarenosa
C	121-140 ⁺	7,5YR 6/6	grão simples	areia franca
Perfil 4				
A1	0-21	7,5YR 3/2	fo, pq, ba c fo, pq, gr	argiloarenosa
A2	21-45(43-62)	7,5YR 3/2	fo, pq, ba	franco-argiloarenosa
C1	45-86	10YR 7/6	grão simples	areia
C2	86-120 ⁺	10YR 8/4	grão simples	areia

Legenda: hor: prof: profundidade; horizonte; fr: fraca; mo: moderada; fo: forte; mp: muito pequena; pq: pequena; md: média gd: grande; mg: muito grande; gr: granular; ba: blocos angulares; bs: blocos subangulares; pr: prismática.

Em relação à cor, é possível observar uma variação no matiz dos horizontes superficiais e subsuperficiais de P1 e P2 em comparação ao P3. P1 e P2 apresentam matiz do horizonte mais superficial é 7,5YR, passando para 5YR nos horizontes transicionais AB ou BA e nos primeiros horizontes B, mudando para 2,5YR no horizonte mais profundo. O horizonte A desses perfis apresenta coloração bruno-escuro, com pouca expressão do matiz, devido à predominância do valor (3) e à baixa intensidade do croma (2), ou seja, não é perceptível a tonalidade de vermelho ou amarelo vibrantes.

De acordo com Medeiros et al. (2013), a presença de matéria orgânica é um dos fatores que influenciam a variação de cor do solo. Nos horizontes superficiais, ela promove uma expressão mais significativa da goethita. Ambientes mais úmidos favorecem a oxidação parcial do ferro, que se complexa com compostos orgânicos, facilitando sua mobilização e posterior precipitação na forma de goethita. Essa interação pode levar à formação de complexos de cores escuras, escurecendo o solo e reduzindo os valores e cromas do matiz, como observados nos horizontes superficiais desses perfis.

Nos horizontes subsuperficiais, observa-se uma coloração mais avermelhada, como bruno avermelhada ou vermelha, que se torna mais marcante em comparação aos horizontes superficiais. Essa variação de cores pode ser atribuída principalmente à presença de matéria

orgânica, além das às condições de drenagem ao longo do perfil, que interferem na proporção de hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). A hematita se forma preferencialmente em ambientes que promovem a oxidação total do ferro, como ambientes mais secos, com menor disponibilidade de água e com baixos teores de matéria orgânica, o que limitam sua hidratação e sua complexação com compostos orgânicos para hidratação (Kämpf & Curi, 2000). Esse padrão pode ser observado nos valores do valor (4) e croma (6) dos horizontes B, mais altos, quando comparados aos horizontes superficiais.

No estudo de Curi & Franzmeier (1984), o mesmo padrão foi observado, evidenciando a variação da proporção entre goethita/goethita+hematita em consonância com as características topográficas e de drenagem do solo. Pinheiro Junior et al. (2012), ao investigarem a formação de solos em materiais de origem calcária, também verificaram essa relação da cor com o balanço de hematita e goethita no solo. Da mesma forma, Pereira et al. (2013), estudando solos de natureza calcária na Serra da Bodoquena, observaram matizes mais avermelhados nos horizontes subsuperficiais, principalmente em função do material de origem.

Em contraste, no P3, o matiz é 5YR nos horizontes superficiais, com cor bruno-avermelhado-escuro, mudando para 2,5YR nos horizontes B, com cores bruno-avermelhado e vermelho, e para 7,5YR na camada C, com cor amarelo-avermelhado. Verifica-se que nos subhorizontes com maior conteúdo de argila, o valor é mais baixo (4) em comparação ao subhorizonte com maior conteúdo de areia, cujo valor é 6. Essa condição pode ser atribuída ao maior poder de pigmentação da argila, que, devido à sua maior superfície específica em comparação com a areia, permite uma interação mais intensa com os minerais e compostos químicos que influenciam a cor do solo. Além disso, a argila tem a capacidade de reter íons de ferro, que são responsáveis pela coloração dos solos (Soares et al., 2005).

O perfil P4, está localizado na parte mais baixa da encosta e apresenta elevado teor de areia nos horizontes mais profundos. Os horizontes A1 e A2 exibem uma tonalidade bruno-escuro, representada pela cor 7,5YR 3/2. As camadas C1 e C2 possuem cor 10YR 7/6 e 10YR 8/4, respectivamente. Os valores e cromas das camadas C do perfil P4, assim como da camada C do perfil P3, são considerados altos, evidenciados por cores mais claras e puras, ou seja, de alta saturação. Isso pode estar diretamente ligado à natureza calcária do material de origem desse solo e aos menores teores de matéria orgânica e óxidos de ferros nessas camadas, que são os principais agentes pigmentantes do solo (Kämpf & Curi, 2000; Medeiros et al., 2013).

A estrutura do solo é um aspecto importante a ser considerado na análise de perfis do solo, ela se refere ao arranjo das partículas unitárias do solo (areia, silte e argila) em unidades estruturais denominadas de agregados (Brady & Weil, 1996). Quanto ao tamanho dos agregados, esse variou de muito pequeno a pequeno nos horizontes superficiais, enquanto nos subsuperficiais foram observados do tamanho pequeno, médio, grande e muito grande. Quanto ao tipo, a presença de estruturas granulares com grau de desenvolvimento moderado e forte pode estar relacionada à alta estabilização da matéria orgânica e à maior atividade microbiana nestes horizontes (Demattê et al., 2003; Silva Neto et al., 2012). Outro fator que pode contribuir para a formação dessas estruturas é a presença de humatos de cálcio. Na análise dos atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos na Paraíba, Corrêa et al. (2003) constataram que os humatos de cálcio pode ser um dos elementos responsáveis pela formação dessas estruturas. Sua influência se dá pela capacidade de aglutinar as partículas do solo e melhorar a coesão entre elas, resultando em agregados mais estáveis e de maior coesão.

Já nos horizontes subsuperficiais B dos perfis há o predomínio de estrutura do tipo blocos angulares e subangulares, com grau de desenvolvimento moderado e forte, decorrente ao aumento dos teores de argila. A argila atua como um agente cimentante, ligando as partículas do solo umas às outras e preenchendo os espaços entre as partículas maiores, o que promove a coesão e a formação de estruturas em blocos. A orientação das partículas da argila também influencia na formação dessas estruturas, pois durante processos como compactação e

movimento da água, às partículas tendem a se organizar em camadas ou planos, resultando em blocos com bordas retas e ângulos agudos (Andrade, 2015; Silva, 2018). Ainda nos horizontes subsuperficiais, foi observada a presença de estrutura prismática nos perfis P1 (horizonte B2) e P2 (horizonte B1 e B2), composta por blocos angulares e subangulares. Essa estrutura prismática apresenta a dimensão vertical mais desenvolvida em relação às outras dimensões, com a extremidade superior relativamente plana. Geralmente, a estrutura prismática está associada à presença de argilas de alta atividade, que ocasionam movimentos de expansão e contração mais acentuados devido aos ciclos de umedecimento e secagem, resultando em um efeito de fendilhamento no sentido vertical (Ker et al., 2012).

Sobre a classe textural, foram observados diferentes tipos nos perfis analisados. Nos horizontes superficiais identificaram-se as classes francossiltosa e francoarenosa no perfil P1; argiloarenosa no perfil P2; franco-argiloarenosa no perfil P3; e argiloarenosa e franco-argiloarenosa no perfil P4. Já nos horizontes subsuperficiais B, as classes texturais foram argiloarenosa, argila e muito argilosa. Nas camadas C, foram observadas a classe areia franco no perfil P3 e areia no Perfil P4.

Em relação a consistência do solo, os horizontes C1 e C2 do perfil P4, onde as partículas se mostraram individualizadas (estrutura em grão simples), e o horizonte C do perfil P3, que foi avaliado como macio, quanto a consistência seca, todos os outros horizontes para a consistência seca foram identificados os seguintes graus: ligeiramente dura, dura, muito dura e extremamente dura. Nos horizontes B1, B2 e BC do perfil P3 foi verificado o maior grau de resistência, sendo a consistência seca sendo classificada como, extremamente dura. Na avaliação no estado úmido, os horizontes C1 e C2 do perfil P4 não exibiram coesão, enquanto o horizonte C do perfil P3 apresentou agregados que podem ser facilmente esboroados, sendo classificado como muito friável. Ainda para o perfil P3, no horizonte BC foi verificada a maior resistência à pressão, sendo classificado como muito firme. Nos demais horizontes foi observada para a consistência úmida variações entre friável e firme.

Quanto à consistência molhada, analisada através da plasticidade e pegajosidade, em todos os horizontes subsuperficiais foi observada aderência e maleabilidade, sendo classificados como muito plásticos e muito pegajosos, à exceção dos horizontes de transição. Por outro lado, os horizontes C1 e C2 do perfil P4 foram caracterizados por ausência de plasticidade e pegajosidade. A argila confere consistência com maior resistência ao solo devido à sua forte força de coesão entre as partículas, formando agregados mais densos. Além disso, sua alta capacidade de retenção de água, devido à sua superfície altamente carregada, resulta em uma consistência mais firme e friável quando úmida e plástica e pegajosa quando molhada (Pereira et al., 2013; Silva, 2018).

Em todos os perfis que apresentam o horizonte B com acúmulo de argila (t), foi verificada a presença de um aspecto lustroso na superfície dos agregados do solo. Esse brilho é resultado do revestimento das unidades estruturais por um material inorgânico, nesse caso argila, dando origem a feição morfológica denominada de cerosidade. A descrição da cerosidade é baseada na avaliação de dois aspectos principais: o grau de desenvolvimento, que determina a nitidez do brilho e pode ser classificada como fraco, moderado ou forte, e a quantidade, que pode variar entre pouca, comum e abundante (Santos et al., 2015). No perfil P1 foi verificada uma presença significativa de cerosidade nos horizontes B2 e B3, descrita como abundante e moderada. No perfil P2 a cerosidade foi observada em todos os horizontes subsuperficiais, sendo classificada como de ocorrência comum e moderada em B1, abundante e moderada em B2 e B3 e abundante e forte em B4. Ao analisar o perfil P3, verificou-se cerosidade comum e fraca no horizonte B1 e comum e moderada em Bt2 (Santos et al., 2018).

4.2 Atributos Físicos

Observa-se uma considerável variação nos perfis em relação à textura do solo, que representa a proporção das partículas primárias do solo: areia, silte e argila (Tabela 5). Os teores mais elevados de argila predominam nos horizontes subsuperficiais, com 547 g kg⁻¹ em Bt2 no perfil P1, 676 g kg⁻¹ em Bt4 no perfil P2 e 431 g kg⁻¹ em Bt1 no perfil P3. Nestes perfis, os valores mais baixos do conteúdo de argila foram observados nos horizontes superficiais. Em contraste, no perfil P4, o conteúdo de argila diminuiu em profundidade, começando com 368 g kg⁻¹ em A1 e reduzindo para 3 g kg⁻¹ em C1 e C2. No perfil P1, foi identificada a presença de um gradiente textural, enquanto em P2 e P3 essa característica está ausente.

Tabela 5. Atributos físicos dos solos de uma topossequência de natureza carbonática.

Hor	Prof	Areia			Silte	Argila		Sil/Arg	GF	CTC argila
	cm	Total	Fina	Grossa	g kg ⁻¹		Total	Natural		
		-----			-----				%	cmol _c kg ⁻¹
Perfil 1										
A	0-14	332	223	109	546	122	52	4,5	57	
AB	14-25	590	203	387	267	143	108	1,9	24	
BA	25-43	535	212	323	205	260	123	0,8	53	
Bt1	43-70	473	186	287	3	524	280	0,0	47	16,4
Bt2	70-97	287	104	183	166	547	281	03	49	17,1
Bt3	97-130+	276	101	175	232	492	381	0,5	23	21,2
Perfil 2										
A	0-21	473	230	243	90	437	98	0,2	58	
BA	21-38	470	213	257	80	450	322	0,2	28	
Bt1	38-57	459	194	265	88	453	373	0,2	21	27,4
Bt2	57-86	346	226	120	124	530	441	0,2	35	27,0
Bt3	86-112	356	192	164	216	428	335	0,5	22	29,0
Bt4	112-145+	245	134	111	79	676	502	0,1	26	24,9
Perfil 3										
A	0-16	530	233	297	173	297	162	0,6	45	
AB	16-28	554	263	291	162	284	150	0,6	47	
Bt1	28-60	443	221	222	126	431	368	0,3	15	29,8
Bt2	60-100	432	196	236	188	380	300	0,5	21	38,0
BC	100-121	660	317	343	150	190	168	0,8	12	
C	121-140+	818	578	240	115	67	47	1,7	30	
Perfil 4										
A1	0-21	453	242	211	179	368	264	0,5	28	
A2	21-45 (43-62)	521	252	269	187	292	193	0,6	34	
C1	45-86	901	365	536	96	3	0	32,0	100	
C2	86-120+	909	417	492	88	3	0	29,3	100	

Legenda: hor.: horizonte; prof: profundidade; sil: silte; arg: argila; GF: grau de floculação; CTC: capacidade de troca catiônica.

Os maiores teores de silte foram registrados no perfil P1, sendo verificado o valor máximo de 546 g kg⁻¹ no horizonte A. Em relação à fração areia, houve variação nas frações de areia grossa e areia fina. Em todos os horizontes transicionais, seja AB, BA ou BC, foi observada o predomínio da fração de areia grossa em relação a areia fina. No perfil P3, o horizonte C apresentou uma maior porcentagem de areia fina, enquanto nos horizontes C1 e C2 do perfil P4 foi registrada uma maior porcentagem de areia grossa.

Além disso, nos horizontes subsuperficiais dos perfis P1 e P3, a fração de areia grossa foi dominante em relação à areia fina. Essa relação é importante na caracterização do solo, proporção influencia diretamente várias propriedades do solo, como a porosidade, a

permeabilidade e a capacidade de retenção de água e nutrientes. Maior proporção de areia grossa geralmente confere ao solo maior permeabilidade, facilitando a drenagem da água (Corrêa et al., 2003). No que se refere à relação silte/argila, o valor mais baixo (0,1) foi encontrado no horizonte B4 do perfil P2. De acordo com Santos e colaboradores (2006), valores inferiores a 0,6 em horizontes com textura argilosa indicam alto grau de intemperismo. Vale ressaltar que o perfil P2 é o mais profundo da topossequência e possui a textura mais argilosa.

O grau de floculação (GF) dos solos é uma propriedade que descreve a forma como as partículas de argila se agregam ou se encontram dispersas. Com exceção dos horizontes C1 e C2 do perfil P4, todos os demais horizontes revelaram um baixo grau de floculação, sugerindo uma maior dispersão das partículas. Uma possível explicação para essa dispersão significativa é a presença de teores elevados de Mg^{2+} .

Ao examinar as características físicas e químicas dos solos na Paraíba, Corrêa et al. (2003) constataram que o aumento dos teores de argila dispersa estava diretamente relacionado ao efeito dispersante promovido pelo íon magnésio (Mg^{2+}). A mineralogia desses solos, que apresentam uma natureza carbonática, pode também desempenhar um papel na dispersão da argila, como explicado por Morelli & Ferreira (1987). De acordo com Albuquerque et al. (2002), os carbonatos atuam como agente neutralizadores dos efeitos floculantes, contribuindo assim para o processo de dispersão. Outro fator que influencia o GF é o balanço de cargas elétricas no solo, que pode ser negativo, positivo ou neutro. Quando neutro, é denominado ponto de carga zero (PCZ), indicando que o número de cargas positivas e negativas é igual (Teixeira et al., 2017). Isso pode ser observado quando o delta pH (pH em KCl – pH em H_2O) é zero. Nessas condições, a argila está floculada ao máximo. De acordo com os estudos de Raij (1973) sobre a PCZ do solo, o aumento de cargas positivas ou negativas no solo faz com que o pH do meio se afaste do PCZ, resultando na dispersão da argila. Esse fenômeno corrobora com os altos valores de Mg^{2+} , que atua como fator dispersante.

A atividade da argila, que se refere à capacidade de troca de cátions (CTC), variou nos perfis da topossequência estudada. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos et al., 2018), a atividade da argila em P1 foi classificada como baixa, pois a CTC ficou abaixo de $27\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$. Em contraste, em P2 e P3, a CTC superou esse valor, caracterizando a argila como de alta atividade. Em P4, a CTC não foi calculada devido à ausência de um horizonte B. A declividade mais acentuada em P1, que está localizado na parte mais alta da topossequência, pode estar contribuindo para uma maior remoção de cátions básicos, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , por meio de processos de erosão e lixiviação. Esses processos resultam na diminuição da soma de bases (S) em P1 e, conseqüentemente, do valor T (CTC a pH 7,0) nos horizontes subsuperficiais desse solo, em comparação com os perfis P3 e P4. Essa redução na quantidade de cátions trocáveis influencia diretamente na formação de argilas de baixa atividade, pois perfis com menor soma de bases tendem a apresentar minerais de argila menos reativos, como caulinita, que possuem baixa capacidade de troca de cátions. Em P2 e P3, onde a soma de bases é maior, é mais provável a presença de minerais de argila de alta atividade, como os argilominerais do tipo 2:1. Esses minerais são mais reativos e possuem uma maior capacidade de troca de cátions, o que explica os valores mais elevados observados nesses perfis. A combinação de condições favoráveis de drenagem e relevo pode estar contribuindo para a preservação da soma de bases nesses solos. Além disso, a rocha de origem, rica em minerais básicos, fornece uma quantidade significativa de cátions, especialmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , que favorecem a formação de argilas de alta atividade. Esses cátions aumentam a disponibilidade de nutrientes para trocas catiônicas, elevando a CTC (Almeida et al., 2018).

Em relação à estabilidade dos microagregados do solo, os resultados de ADA (Argila Dispersível em Água), ARA (Argila Refloculável em Água) e AND (Argila Não Dispersível) fornecem informações importantes sobre a estabilidade estrutural do solo e sua susceptibilidade a erosão (Tabela 6). Em geral, os horizontes A tem uma quantidade mais alta de ADA,

especialmente nos perfis 2, 3 e 4, o que implicam uma maior susceptibilidade à dispersão de argila na superfície e, portanto, uma tendência à erosão. Essa dispersão torna o solo mais vulnerável à erosão superficial, especialmente em áreas com declividade acentuada, onde o escoamento da água pode remover partículas de argila e degradar a estrutura do solo. Solos com alto teor de ADA na superfície precisam de manejo cuidadoso para evitar degradação. Os horizontes Bt1 apresentam maior quantidade de AND, especialmente no perfil 1, indicando maior estabilidade da argila em profundidade. Isso é comum em horizontes Bt, que têm maior conteúdo de argila e mostram maior estabilidade estrutural, indicando uma resistência maior a dispersão e uma menor susceptibilidade à erosão. Isso é particularmente relevante para solos carbonáticos, onde a estabilidade dos agregados em profundidade pode ser favorecida pela presença de íons floculantes como Ca^{2+} e Mg^{2+} . Nos perfis onde o horizonte Bt1 apresenta menor ADA e maior AND em comparação com o horizonte A, é provável que esteja ocorrendo um processo de translocação de argila. A argila dispersível nos horizontes superficiais pode ser mobilizada pela água e depositada nas camadas subsuperficiais, formando horizontes Bt com acúmulo de argila mais estável. Esse processo é comum em solos de clima mais úmido e em posições da paisagem onde o movimento descendente da água favorece a migração de argila. Em solos carbonáticos, esse acúmulo pode ser influenciado também pela interação entre argila e carbonatos, que contribui para a formação de uma estrutura mais coesa e estável em profundidade, pois íons de cálcio e magnésio ajudam na floculação e na formação de agregados, o que pode explicar os altos valores de AND em profundidade, que indicam que a argila está bem floculada e resistente a dispersão. No entanto, a presença de ADA nos horizontes superficiais sugere que, em algumas áreas, a lixiviação ou a remoção de carbonatos pode estar ocorrendo, reduzindo a estabilidade dos agregados na superfície e aumentando a susceptibilidade à dispersão. A ausência de argila dispersível ou não dispersível no horizonte C1 do perfil 4 indica um material parental pouco desenvolvido ou com baixa capacidade de reter partículas de argila. Essa análise é fundamental para o manejo adequado dos solos, pois solos com altos valores de ADA na superfície, como vistos nos perfis, requerem práticas de manejo que reduzam a dispersão de argila e protejam a estrutura do solo, como o uso de cobertura vegetal (Melo et al., 2019; Pinto et al; 2022).

Tabela 6. Estabilidade de microagregados de solos carbonáticos.

Horizontes	ADA	ARA	AND
----- % -----			
Perfil 1			
A	7	3	2
Bt1	6	2	44
Perfil 2			
A	28	4	12
Bt1	12	2	32
Perfil 3			
A1	23	1	2
Bt1	18	3	22
Perfil 4			
A1	27	5	4
C1	0	0	0

Legenda: ADA= argila dispersível em água; ARA= argila refloculável em água; AND= argila não dispersível.

4.3 Atributos Químicos

Para os perfis estudados foram observados valores de pH em H₂O variando entre 6,55 e 9,04, sendo esses valores decorrentes das características intrínsecas do material de origem (Tabela 7). Dentre os diversos fatores que influenciam o pH no solo, além do material de origem, a matéria orgânica se destaca, visto que maiores valores de matéria orgânica contribuem para a redução do pH do solo, o que pode ser observado nos horizontes superficiais dos perfis. Quanto aos valores determinados, destaca-se o perfil P4, sendo verificado valores de pH 8,02 no horizonte A1 e 9,04 no horizonte C2. Esses valores podem ser justificados pela proximidade desse perfil ao material de origem de natureza calcária. Resultados análogos foram constatados em estudos conduzidos por Pereira et al. (2013), Maranhão et al. (2017) e Pinheiro Junior et al. (2012) sobre solos de natureza calcária.

Tabela 7. Atributos químicos dos solos de uma topossequência de natureza carbonática.

Hor.	Prof cm	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	Al	Ca	Mg	Na	K	H+Al	P Olsen mg kg ⁻¹	P Melich mg kg ⁻¹	S	T	V%
-----cmol _c kg ⁻¹ -----															
Perfil 1															
A	0-14	6,55	5,45	1,10	0,0	6,30	1,30	0,01	0,07	3,47	1,53	5,42	7,67	11,14	68
AB	14-25	6,61	5,26	1,35	0,0	5,60	1,10	0,01	0,03	3,14	1,07	4,46	6,74	9,87	68
BA	25-43	7,09	5,58	1,51	0,0	5,40	1,40	0,01	0,02	1,98	1,07	3,89	6,82	8,80	77
Bt1	43-70	7,12	5,74	1,38	0,0	5,00	1,90	0,01	0,02	1,65	1,16	3,95	6,94	8,59	80
Bt2	70-97	6,92	5,36	1,56	0,0	5,50	1,70	0,01	0,03	2,15	1,16	4,08	7,24	9,38	77
Bt3	97-130+	6,79	5,36	1,43	0,0	4,50	3,60	0,01	0,01	2,31	1,25	4,08	8,13	10,44	77
Perfil 2															
A	0-21	6,69	5,43	1,26	0,0	7,10	2,90	0,01	0,02	2,81	1,53	4,72	10,04	12,84	78
BA	21-38	7,42	5,89	1,53	0,0	6,90	3,60	0,01	0,02	1,82	1,34	4,08	10,53	12,35	85
Bt1	38-57	7,56	5,95	1,61	0,0	7,20	3,70	0,02	0,01	1,49	1,53	3,89	10,93	12,41	88
Bt2	57-86	7,50	5,80	1,70	0,0	7,60	5,50	0,02	0,01	1,16	1,43	3,83	13,13	14,28	91
Bt3	86-112	7,48	5,88	1,60	0,0	7,80	3,60	0,02	0,01	0,99	1,43	3,70	11,43	12,42	92
Bt4	112-145	7,54	5,81	1,73	0,0	7,90	8,10	0,02	0,01	0,83	1,34	3,70	16,03	16,86	95
Perfil 3															
A1	0-16	6,80	5,25	1,55	0,0	5,50	3,90	0,01	0,04	2,15	1,62	4,40	9,45	11,59	81
AB	16-28	6,90	5,44	1,46	0,0	5,90	5,00	0,01	0,02	2,15	1,53	4,46	10,93	13,08	83
Bt1	28-60	6,96	5,29	1,67	0,0	6,00	5,00	0,01	0,01	1,82	1,25	3,89	11,02	12,84	85
Bt2	60-100	7,08	5,25	1,83	0,0	5,70	6,90	0,01	0,01	1,82	1,43	3,83	12,62	14,44	87
BC	100-121	7,40	5,74	1,66	0,0	4,70	17,20	0,01	0,01	0,83	1,53	7,78	21,92	22,75	96
C	121-140+	7,59	5,63	1,96	0,0	6,10	35,80	0,01	0,01	0,17	1,80	4,30	41,92	42,08	99
Perfil 4															
A1	0-21	8,02	6,67	1,35	0,0	10,10	8,40	0,01	0,04	0,33	1,34	5,23	18,55	18,88	98
A2	21-45(43-62)	8,05	6,69	1,36	0,0	9,20	15,50	0,01	0,03	0,17	1,62	7,97	24,74	24,90	99
C1	45-86	8,87	7,56	1,31	0,0	7,50	22,20	0,01	0,01	0,33	1,62	4,14	29,72	29,39	98
C2	86-120+	9,04	7,65	1,39	0,0	6,70	21,00	0,01	0,01	0,33	1,71	4,02	27,73	27,40	98

Legenda: Hor.: horizonte; Prof.: profundidade; COT: carbono orgânico total.

Os valores de pH em água foram superiores aos determinados com a solução de KCl 1 mol L⁻¹, gerando um ΔpH negativo em todos os horizontes. Esse padrão indica predomínio de cargas negativas na superfície dos colóides. O ΔpH pode ser utilizado como um indicador do grau de intemperismo do solo. Quanto maior o grau de intemperismo, maior a quantidade de cargas positivas no solo, e consequentemente menor o valor de pH, sendo possível algumas situações ser identificados valor de ΔpH positivo.

Quanto aos valores de Ca²⁺ e Mg²⁺ o material de origem do solo exerce influência na disponibilização desses cátions básicos. Os valores mais elevados foram observados no perfil P4, localizado no terço inferior da topossequência. Dentre as bases trocáveis, os cátions predominantes no complexo sortivo foram o Ca²⁺ e o Mg²⁺, com valores variando entre 5,0 e 10,1 cmol_c kg⁻¹ para o Ca²⁺ e entre 1,10 e 35,8 cmol_c kg⁻¹ para o Mg²⁺. O valor de 35,8 cmol_c kg⁻¹ foi observado na camada C do perfil P3. Os íons de cálcio, presentes em alta concentração nesses solos, podem interagir com substâncias húmicas, formando complexos orgânicos conhecidos como humatos de cálcio. Esses complexos proporcionam mais estabilização da matéria orgânica, afetando as frações de ácidos húmico e fúlvico, e consequentemente, influenciando a cor do solo, permitindo a expressão de tonalidades mais escuras. Além disso, os humatos de cálcio são capazes de absorver diferentes comprimentos de onda da luz visível, o que contribui para a expressão dessas cores mais escuras (Corrêa et al., 2003; Kämpf & Curi, 2012).

Os valores de K⁺ variaram de 0,01 a 0,07 cmol_c kg⁻¹, enquanto o Na⁺ apresentou valores médios de 0,01 cmol_c kg⁻¹ em praticamente todos os perfis analisados. Baixos valores de Na⁺ em solos que contém albita em sua composição mineral podem estar relacionados à liberação lenta desse elemento, um processo dependente de condições ambientais favoráveis à alteração mineral, como o intemperismo químico. Além disso, o sódio liberado poder ser rapidamente removido do solo por lixiviação, especialmente em regiões de alta pluviosidade, o que facilita sua mobilidade e o transporte para fora do sistema do solo (Melo et al., 2018). Observou-se uma variação dos teores desses íons ao longo dos perfis, destacando-se, especialmente, a redução de Ca²⁺ em profundidade no perfil P4, o que sugere a ocorrência de processos de lixiviação ou migração de cátions do solo. Esses processos podem ser influenciados por fatores como a lixiviação, a capacidade de troca iônica e a mineralogia do solo. Não foram observados teores de Al³⁺ em todos os perfis, devido aos elevados valores de pH e cátions básicos. No que diz respeito à saturação por bases (V%), todos os perfis apresentam valores acima de 50%, o que, de acordo com Santos et al. (2018), classifica os perfis como eutróficos. Nos horizontes A, os valores de V% mais baixos ocorrem nos perfis P1, P2 e P3, sendo 68%, 78% e 81%, respectivamente. No perfil P4 foram quantificados os mais elevados valores de V% ao longo do perfil, registrando 98% em A1, C1 e C2 e 99% em C1.

Em relação ao fósforo (P), foram realizadas análises utilizando dois extratores diferentes: o método de Olsen, que utiliza uma solução alcalina, e o método Mehlich-1, que utiliza uma solução ácida. Observou-se que os valores mais elevados de fósforo pelo método Olsen ocorreram nos horizontes C dos perfis P3 e P4, com 1,80 mg kg⁻¹ em P3 e 1,71 mg kg⁻¹ no C2 de P4, o que pode refletir uma maior disponibilidade de fósforo em camada mais profundas, possivelmente associada a fontes minerais de fósforo ou a menor fixação de fósforo nessas condições alcalinas. Por outro lado, os valores mais baixos determinados pelo método Olsen foram observados nos horizontes transicionais de P1, com um valor de 1,07 mg kg⁻¹, o que indica menor disponibilidade de P nessas camadas. Ao aplicar o método Mehlich-1, os valores observados foram superiores aos de Olsen, com registros acima de 7 mg kg⁻¹ nos horizontes BC de P3 e A2 de P4, enquanto a média geral se manteve dentre 3 e 4 mg kg⁻¹. Esses resultados reflete a capacidade do Mehlich-1 de solubilizar formas de fósforo que podem não ser extraídas pelo método alcalino de Olsen. A solução de Mehlich-1 é composta por uma mistura de HCl e H₂SO₄, proporcionando um pH ácido (cerca de 1,5), que dissolve formas de

fósforo ligadas a carbonatos de cálcio e magnésio, que são comuns em solos alcalinos. A acidez da solução ajuda a liberar o fósforo dessas associações, aumentando o teor extraído, enquanto a solução alcalina de Olsen (NaHCO_3 a pH 8,5) não é capaz de solubilizar essas formas com a mesma eficiência (Olsen, 1954; Santos et al., 2018).

Quanto aos teores de carbono orgânico total (COT), destaca-se o horizonte A do perfil P1, com $17,23 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto os menores valores foram observados nas camadas C1 e C2 do perfil P4, com $0,21 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 8). Notou-se que os teores de COT diminuem com a profundidade em todos os perfis analisados. Outro aspecto relevante é que os valores mais altos de COT foram encontrados no horizonte mais superficial dos perfis localizados nas partes mais elevadas da topossequência, especificamente nos perfis P1 e P2, que correspondem ao topo e ao terço superior, respectivamente. Em contraste, os perfis P3 (terço médio) e P4 (terço inferior) apresentam teores de COT menos expressivos. Essa variação nos teores de COT está relacionada a diversos fatores relacionados à posição topográfica e à dinâmica do solo. Nos perfis P1 e P2 há maior aporte de matéria orgânica devido à maior presença de vegetação. Já nas áreas mais baixas da topossequência, como nos perfis P3 e P4, a erosão superficial pode remover a matéria orgânica, resultando em menores valores de COT.

Tabela 8. Carbono orgânico total, substâncias húmicas dos perfis, relação entre ácido fúlvico, ácido húmico e humina.

Horizonte	CaCo3	COT	C-FAF	C-FAH	C-HUM
----- g kg ⁻¹ -----					
Perfil 1					
A	36	17,23	2,15	3,12	8,76
AB	29	13,42	1,04	3,35	6,74
BA	19	7,82	-	-	-
Bt1	16	4,91	-	-	-
Bt2	40	1,55	-	-	-
Bt3	45	1,78	-	-	-
Perfil 2					
A	39	12,08	0,62	2,66	6,20
BA	21	6,48	-	-	-
Bt1	33	2,67	-	-	-
Bt2	45	1,10	-	-	-
Bt3	37	0,88	-	-	-
Bt4	39	1,10	-	-	-
Perfil 3					
A	20	9,17	0,95	2,43	8,49
AB	23	8,82	0,81	1,64	8,22
Bt1	47	2,22	-	-	-
Bt2	44	2,22	-	-	-
BC	59	0,66	-	-	-
C	79	0,43	-	-	-
Perfil 4					
A1	43	9,27	0,90	1,04	7,95
A2	54	7,81	0,67	0,90	7,55
C1	120	0,21	-	-	-
C2	120	0,21	-	-	-

Legenda: COT= carbono orgânico total; AH= ácido húmico; AF= ácido fúlvico; EA= extrato alcalino; HUM= humina.

Quanto as substâncias húmicas, os maiores teores de carbono foram quantificados na fração humina, em todos os perfis, seguido pela fração ácido húmico e ácido fúlvico. Foi observado pouca variação entre os valores, com o C-FAF de 0,67 a 2,15 g kg⁻¹, o C-FAH de 0,90 a 3,35 g kg⁻¹ e o C-HUM de 6,20 a 8,76 g kg⁻¹. O perfil P4 exibiu um predomínio significativamente maior da fração humina, com uma média de 81% dessa fração no horizonte

superficial, seguido pela fração ácido húmico, que representou 11%, e a fração ácido fúlvico, com 8%. Essa mesma relação foi observada nos outros perfis, com médias de 75% de humina no perfil P3, 65% no perfil P2 e 61% no perfil P1. Nota-se uma clara correlação entre a porcentagem da fração humina e a posição no perfil da encosta. No ponto mais elevado (P1), a porcentagem dessa fração é significativamente menor em comparação com o ponto mais baixo (P4). Conforme destacado por Sposito (2008), a fração humina é caracterizada por uma notável estabilidade no solo, uma vez que é menos solúvel e mais polimerizada quando comparada aos ácidos fúlvico e húmico. Em contrapartida, o ácido fúlvico é a fração menos polimerizada, apresentando menor estabilidade e maior solubilidade, tornando-o mais suscetível a alterações, tanto de origem antrópica quanto natural, no ambiente.

Para a relação C-FAH/C-FAF os valores variam de 0,87, no horizonte A1 do perfil P4, a 0,23, no horizonte A do perfil P2. Enquanto para a relação C-EA/C-HUM verificou-se valores variando de 0,21 no horizonte A2 do perfil P4, a 0,65, no horizonte AB do perfil P1. Não teve valores maiores que 1 para essas relações. Embora os perfis P3 e P4, localizados nas porções média e inferior da encosta, apresentem menor conteúdo de COT em comparação aos perfis P1 e P2, aos valores da relação C-EA/C-HUM $\leq 0,5$ indicam maior estabilidade da matéria orgânica e uma interação mais forte com a matriz mineral do solo. Essa estabilidade e durabilidade são favorecidas pela interação da matéria orgânica com cátions trocáveis, como o cálcio, além de partículas de argila e óxidos de ferro, que reduzem sua decomposição e tornam grande parte da matéria orgânica insolúvel. (Brieds et al., 2012). Esses valores sustentam a predominância da fração humina e são características típicas dos horizontes A chernozêmicos. Os valores abaixo de 0,5 da relação C-EA/C-HUM nos perfis P1 e P2 indicam que o cálcio proveniente do material de origem está apresentando uma relação mais significativa com a matéria orgânica nos perfis P3 e P4, que refletem as características predominantes do material de origem na formação desses solos. Essas relações foram o foco de estudos realizados por Valladares et al. (2007) e Fontana et al. (2008 e 2011), revelando resultados consistentes que destacam a influência do grau de pedogênese na intensidade do intemperismo e, por conseguinte, na preservação dos constituintes do solo.

4.4 Atributos Mineralógicos

4.4.1 Mineralogia da fração areia

A figura 5 exibe difratogramas de raios X (XRD) com picos de intensidade em diferentes ângulos 2-theta, correspondente aos minerais presentes na fração areia dos perfis P3 e P4. Esses picos são acompanhados por valores de espaçamento interplanar em angstroms, identificando os minerais. Os minerais detectados foram quartzo (Qz), com picos principais em aproximadamente 0,33, 0,25 e 0,18nm, albita (Ab), com pico em torno de 0,32 e 0,38nm, clorita (Cl), com pico característico em 1,45nm, dolomita (Do), com picos em 0,29 e 0,20nm e ilita (Il), com pico em torno de 0,27nm.

O quartzo, presente em quase todas as rochas sedimentares, ígneas e metamórficas, é um mineral composto por óxido de silício (SiO₂) conhecido por sua resistência ao intemperismo químico e físico. A estrutura cristalina tridimensional do quartzo, formada por ligações covalentes fortes, explica sua estabilidade e durabilidade em ambientes superficiais, como indicam Resende et al. (2005) e Navarro et al. (2017). Estudos anteriores, como os de Vasconcelos et al. (2013) e Maranhão et al. (2014), também reportam a presença dominante de quartzo na fração areia de solos calcários brasileiros, atribuindo essa ocorrência à sua estrutura tectossilicática, que confere grande resistência ao intemperismo.

A albita, um feldspato plagioclásico, da classe dos tectossilicatos, é composta por aluminossilicato de sódio e cálcio e comumente encontrada em rochas ígneas e metamórficas. Sua presença na fração areia pode ser explicada pela contribuição de fragmentos rochosos

adjacentes que contêm feldspatos. A albita é menos resistente ao intemperismo que o quartzo, no entanto, em condições alcalinas e de intemperismo moderado, como em solos carbonáticos, ela tende a ser preservada. Segundo Mota et al. (1999) e Navarro et al. (2017), a menor intensidade de intemperismo em solos com pH alcalino ajuda a manter a estabilidade da albita.

A clorita, identificada por seu pico basal em 1,45nm é típica de ambientes de intemperismo moderado e leve, sendo um argilomineral comum em rochas metamórficas. Sua presença na fração areia indica uma possível herança do material parental e é favorecida por condições de intemperismo moderados, comuns em solos alcalinos e neutros, onde o pH mais elevado contribui para a estabilidade deste mineral. A dolomita é um mineral característico de rochas carbonáticas, como o mármore dolomítico. Fragmentos de dolomita tendem a se acumular na fração areia durante o intemperismo, principalmente em ambientes com pH levemente ácido a neutro, onde sua decomposição ocorre mais lentamente em comparação com a calcita. A presença de dolomita sugere uma origem carbonática do solo, indicando intemperismo parcial de rochas como o mármore dolomítico, onde fragmentos ainda permanecem intactos (Sampaio et al., 2005; CPRM, 2016; Navarro et al., 2017).

Por fim, a illita, um argilomineral típico de condições de intemperismo moderado e pH alcalino, geralmente se forma em solos derivados de rochas carbonáticas. A illita pode se desenvolver a partir da alteração de feldspatos potássicos e micas do material original. Sua presença na fração areia sugere um nível de intemperismo suficiente para sua formação, mas não tão intenso a ponto de transformá-la em minerais mais estáveis, como a caulinita. Em solos com pH alcalino, a illita se mantém estável e resiste à decomposição, como apontam Navarro et al. (2017) em seu estudo sobre rochas e minerais.

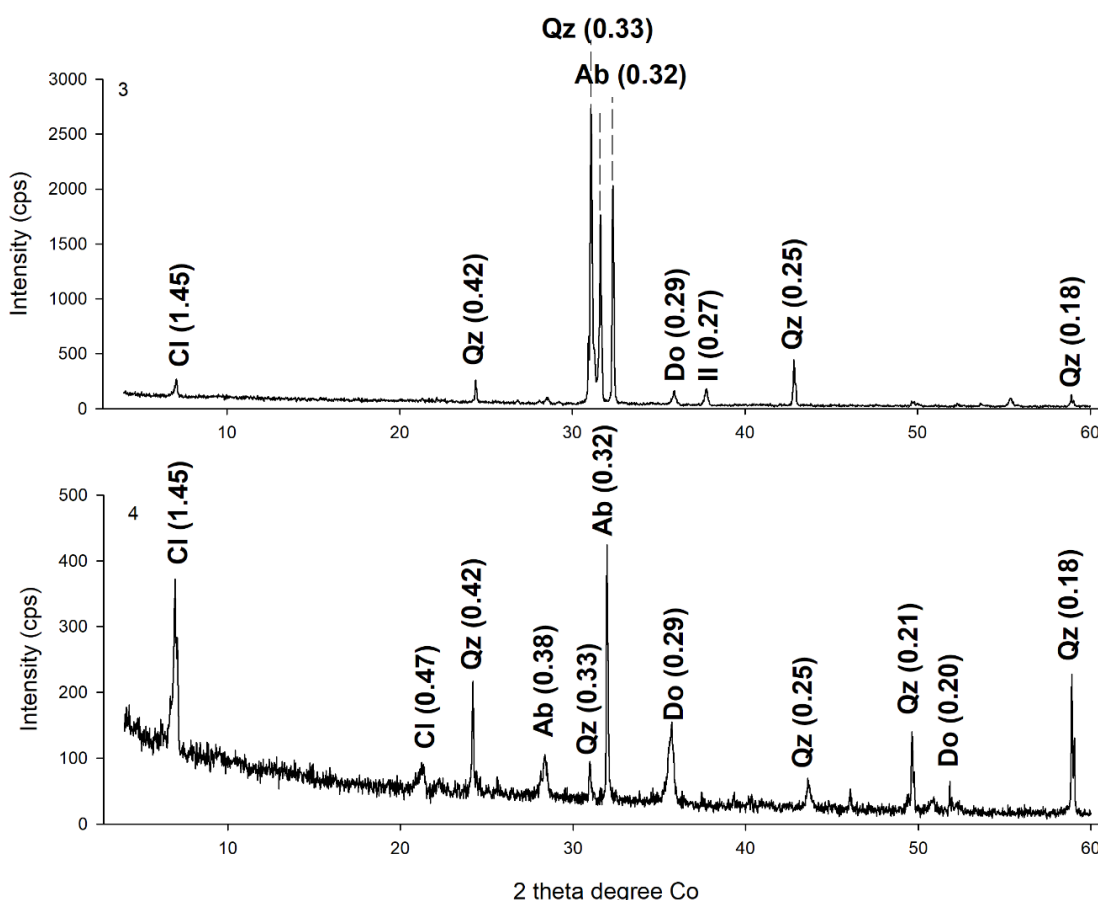


Figura 5. Difratoograma da fração areia dos perfis 3 e 4. Al=albita, Cl=clorita, Il=ilmenita, Do=dolomita, Qz=quartzo.

4.4.2 Mineralogia da fração argila

Quanto a fração argila dos perfis P3 e P4, está é composta por dolomita e caulinita, predominantemente (Figura 6). A caulinita foi identificada com picos de 0,71, 0,43 e 0,35nm, enquanto a dolomita em picos de 0,28 e 0,20nm. A presença desses minerais na fração argila de solos carbonáticos é relativamente comum e pode ser explicada por processos pedogenéticos e pela origem do material desses solos.

A caulinita é um argilomineral pertencente ao grupo dos filossilicatos, formado principalmente pelo intemperismo de minerais primários em condições específicas de pH e composição da solução do solo. De acordo com Melo e Wypych (2009), a formação de caulinita é favorecida em solos com pH ácido e baixos teores de cátions como Na, Ca, Mg Fe e K na solução do solo. Entretanto, essas condições contrastam com as observadas no presente estudo e nos trabalhos de Pinheiro Junior (2018) e Silva (2013), que analisaram solos de origem carbonática e ainda assim identificaram uma presença significativa de caulinita na fração argila. De modo geral, o mármore e outras rochas carbonáticas não fornecem alumínio em quantidade suficiente para a formação de argilominerais aluminosos, como a caulinita. No entanto, processos como intemperismo, lixiviação e enriquecimento por fontes externas podem contribuir para a presença de alumínio e sílica, essenciais para a formação desse mineral. Em solos tropicais e subtropicais os minerais silicatados tendem a se decompor, liberando sílica e alumínio, que são elementos essenciais para a formação da caulinita. Mesmo em solos carbonáticos, esses elementos podem estar presentes em quantidades suficientes para permitir a formação de caulinita sob condições específicas. Além disso, em ambientes alcalinos, como os solos carbonáticos, a lixiviação seletiva de sílica pode facilitar a formação de caulinita, ao remover outros componentes que inibiram sua precipitação (Navarro et al., 2017). Isso pode ocorrer especialmente em solos submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, que promovem a mobilidade de cátions e ânions na solução do solo.

A presença de dolomita tanto na fração argila indica a resistência desse mineral ao intemperismo e sua capacidade de persistir como um constituinte do solo. Esse comportamento é coerente com a natureza desses solos, onde os minerais carbonáticos, como a dolomita, permanecem na fração argila devido ao menor grau de intemperismo químico, especialmente em comparação com solos formados em ambientes mais ácido. A persistência da dolomita reflete uma forte influência do mármore dolomítico, que é o material de origem dos solos estudados. A dolomita é conhecida por sua estabilidade em ambientes alcalinos e por ser menos suscetível ao intemperismo químico do que outros minerais carbonáticos, como a calcita. Essa estabilidade química em condições alcalinas permite que a dolomita permaneça no solo mesmo após processos de intemperismo e pedogênese, contribuindo para a mineralogia da fração argila (Cavalcanti et al., 2013; Navarro et al., 2017)

A coexistência de dolomita e caulinita na fração argila desses solos reflete a complexidade dos processos geológicos e pedogenéticos que moldaram esses solos. A presença conjunta desses minerais sugere uma interação entre herança mineral e processos de intemperismo e lixiviação. Enquanto a dolomita persiste devido a sua estabilidade, a caulinita se forma como resultado do intemperismo de minerais silicatados, indicando que os materiais de origem influenciam fortemente a mineralogia do solo, mesmo em condições ambientais que não seriam ideais para a neoformação de certos minerais (Sampaio et al., 2005; Cavalcanti et al., 2013).

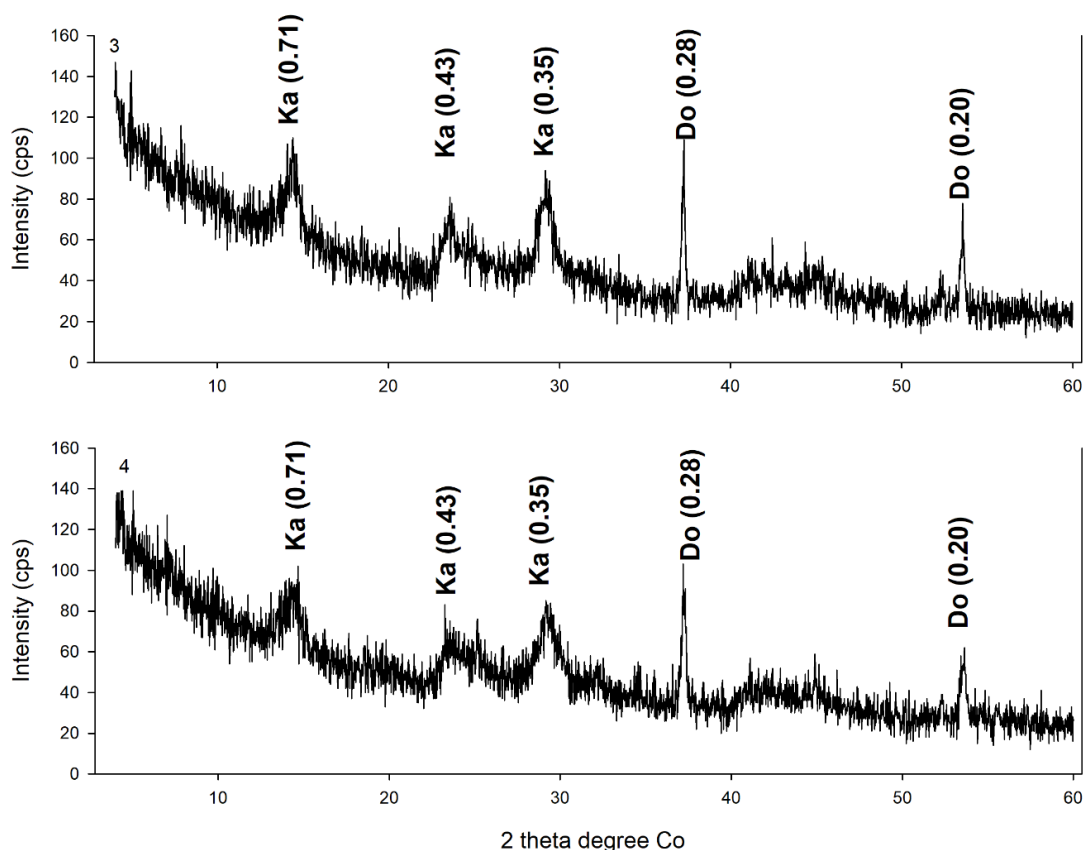


Figura 6. Difratoograma da fração argila dos perfis 3 e 4. Do=Dolomita, Ka=caulinita

4.5 Gênese e Classificação dos Solos

A variação dos perfis ao longo da topossequência está intrinsicamente relacionada com o relevo, o qual exerce influência direta sobre os padrões de drenagem e escoamento superficial, atuando em processos erosivos e na lixiviação de solutos. Quanto maior a declividade, maior o escoamento superficial. Essa variação conduz a processos distintos, resultando consequentemente em diversas classes de solo (Reis, 2012). O material de origem, de natureza calcária, é o mesmo em toda a topossequência.

Dentre os diversos processos envolvidos na formação do solo, é possível identificar a ocorrência de adição, perda, translocação e transformação em diferentes graus nos perfis analisados. Nos perfis P1, P2 e P3, destaca-se a presença de um horizonte B textural, o qual se caracteriza pelo acúmulo de partículas de argila, evidenciado pela manifestação de cerosidade, uma característica lustrosa que se torna visível na superfície dos agregados (Santos et al., 2015).

A cerosidade indica a ocorrência de translocação de argila do horizonte superficial para o subsuperficial. Além disso, é relevante ressaltar o processo de eluviação/iluviação, que engloba a migração de partículas de argila das camadas mais superficiais do solo até os horizontes mais profundos. Observa-se o fenômeno de melanização nos perfis P3 e P4, um processo pedogenético específico que se manifesta pelo escurecimento do horizonte A devido à incorporação de matéria orgânica e húmus.

Os perfis P1 e P2 receberam a classificação de horizonte superficial A moderado, uma vez que não preenchem todos os critérios necessários para serem categorizados nos demais horizontes diagnósticos superficiais. Em contrapartida, os perfis P3 e P4 foram identificados como A chernozêmico, pois apresentaram os requisitos quanto à espessura, cor, saturação por

bases, estrutura e conteúdo de carbono orgânico estipulados para essa classificação (Santos et al., 2018).

O processo de carbonatação ocorre nos perfis de solo devido ao material de origem rico em carbonatos. No relevo ondulado, às áreas de topo e de vertentes geralmente apresentam menor acúmulo de água, o que favorece a precipitação de carbonatos nas camadas superficiais e subsuperficiais. Com a percolação da água, os carbonatos podem ser redistribuídos no perfil, e sua concentração tende a aumentar nas áreas de acumulação, como nas partes mais baixas da paisagem. A melanização, por sua vez, é intensificada em áreas de relevo ondulado onde há maior acúmulo de matéria orgânica, como nas zonas de menor declive, que retêm mais água e matéria orgânica. Esse processo promove o escurecimento dos horizontes superficiais, criando camadas ricas em matéria orgânica e de intensa atividade biológica. A presença e a intensidade dos processos de carbonatação e melanização, associados ao relevo, são fundamentais para a classificação dos solos. A formação de horizontes específicos, como o horizonte chernozêmico, característica importante para a classificação de solos, permite diferenciar tipos de solo ao longo da topossequência e estabelecer classes taxonômicas adequadas, como os Chernossolos, que apresentam um horizonte superficial escuro devido a melanização e alta concentração de carbonatos em profundidade (Kämpf e Curi, 2012; Santos et al., 2018).

Em relação à classificação até o quarto nível categórico conforme o SiBCS (Santos et al., 2018), os perfis foram hierarquizados da seguinte forma: P1, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico. Isso se deve à presença de horizonte B textural com alta saturação por bases, porém, com presença de argila de atividade baixa no horizonte B1. No nível de subordem o perfil foi classificado como Vermelho-Amarelo, devido ao matiz do solo que não se enquadra em nenhuma das subordens anteriores. No nível de grande grupo, o termo “Eutrófico” foi utilizado pela saturação por bases superior a 50%, enquanto no subgrupo o “típico” é aplicado por não se enquadrar em nenhuma das classes anteriores (Santos et al., 2018) (Figura 4).



Figura 7. Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira

Quanto ao perfil P2, esse foi classificado como Luvissole Crômico Pálico típico. O perfil foi classificado na ordem Luvissole devido a presença de argila de atividade alta e saturação por bases também alta nos horizontes subsuperficiais Bt1, Bt2 e Bt3. A classificação “Crômico” é devida a coloração do perfil, com predomínio de matiz 5YR, com valores iguais ou maiores que 3 e cromas iguais ou maiores que 4 em todos os horizontes B. O grande grupo “Pálico” se refere a espessura do solum, que excede 80 cm. Enquanto o subgrupo típico deve-se ao fato de que não se enquadra nas classes anteriores (Santos et al., 2018) (Figura 5).



Figura 8. Luvisolo Crômico Pálico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.

Os perfis P3 e P4 foram classificados como Chernossolos, devido à presença do horizonte superficial A chernozêmico, associado aos atributos de cor, saturação por base e atividade da fração argila. Para o P3, a classificação é Chernossolo Argilúvico Órtico típico, uma vez que o horizonte A chernozêmico é seguido por horizonte B textural. No que diz respeito à classificação em grande grupo e subgrupo, devido à falta de correspondência com classes anteriores, a classificação ficou como Órtico e típico, respectivamente (Figura 6).



Figura 9. Chernossolo Argilúvico Órtico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.

Já o perfil P4, foi classificado como Chernossolo Háptico Órtico típico, uma vez que não apresenta horizonte B textural ou qualquer outra característica que o enquadrasse em classes anteriores no sistema, nos níveis de subordem, grande grupo e subgrupo (Santos et al., 2018) (Figura 7).



Figura 10. Chernossolo Háplico Órtico típico. Foto: Marcos Gervasio Pereira.

4.8 Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras

A classe de aptidão dos perfis é apresentada na Tabela 9. Os perfis são eutróficos, caracterizados pela ausência de grandes limitações em relação à fertilidade natural. No que diz respeito ao perfil P1, a limitação é considerada ligeira (L) para produtores de nível A, podendo ser melhorada com práticas simples, utilizadas para o agricultor B, podendo ser atingido o grau (N₁). Quanto ao nível tecnológico C, mantém-se esse mesmo grau, devido não ser necessário o emprego de práticas que necessitem de um maior nível de investimento e/ou conhecimento. Quanto aos perfis P2, P3 e P4, a fertilidade foi avaliada como nula (N), não sendo necessária nenhuma intervenção adicional para os produtores de níveis B e C.

Em relação à deficiência de água, verifica-se que na área ocorre um déficit de hídrico de 4 a 6 meses, sendo este um fator limitante. Em função do SAAAT não levar em consideração práticas de melhoramento para esse fator o mesmo grau (M) foi estabelecido para os diferentes tipos de agricultor. Quanto à deficiência de oxigênio, para os perfis estudados não foram observadas limitações, devido à declividade da área, sendo os mesmos avaliados com grau de limitação nula (N).

Uma das maiores limitações observada para todos os perfis foi a susceptibilidade à erosão, influenciada pela declividade e comprimento da vertente. A susceptibilidade foi classificada como muito forte (MF) para os perfis P1 e P2, e forte (F) para os perfis P3 e P4. Adicionalmente, o impedimento à mecanização, foi um fator que limitou as condições de melhoramento, também foi considerado, levando em conta a declividade do terreno. Os graus

de limitação para mecanização foram classificados como forte (F) para os perfis P1 e P2 e moderado (M) para os perfis P3 e P4 (Ramalho Filho e Beek, 1994) (Figura 3, 4 e 5).

Com base na avaliação dos graus de limitação dos perfis para cada nível de produtor, foram determinadas as aptidões específicas para cada perfil. Os perfis P1 e P2 foram classificados como tendo aptidão restrita para pastagem plantada para produtores de nível B, devido à alta susceptibilidade à erosão, que é o principal fator limitante também para produtores de níveis A e C. Embora o sistema permita melhorias, estas não são financeiramente viáveis. Portanto, apesar da aptidão final segundo o SAAAT indicar pastagem restrita para produtores de nível B, a recomendação é destinar a área à preservação, sendo avaliada como inapta. Já os perfis P3 e P4 foram classificados com tendo aptidão restrita para lavoura para os produtores de nível A, com a erosão e a mecanização sendo os principais fatores limitantes para produtores de níveis B e C. Assim como nos perfis P1 e P2, embora o SAAAT indique a lavoura como uso agrícola adequado para esses solos, de acordo com o Código Florestal nº 12.651 de 25 de maio de 2012, que regula a proteção da vegetação nativa, esses perfis estão situados no terço médio e inferior de uma encosta com 40% de declive, o que caracteriza a área como inapta para esse tipo de atividade. A exceção, viável apenas quando possível, é o emprego de sistemas agroflorestais e/ou integração pecuária floresta, com o objetivo de promover o manejo sustentável e proteção da área (Ramalho Filho e Beek, 1994).

Tabela 9. Classe de aptidão agrícola dos perfis de uma topossequência de natureza carbonática.

Fator limitante															
Fertilidade			Água			Oxigênio			Erosão			Mecanização			
Nível de manejo															
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Perfil 1															
Grau de limitação	L	N ₁	N ₁	M	M	M	N	N	N	MF	MF	MF	F	F	F
Grupo e classe de aptidão agrícola	2a	1B	1C	2a	2b	2c	1A	1B	1C	-	4(p)	-	3(a)	4(p)	-
Aptidão final							A -	B 4(p)	C -						
Perfil 2															
Grau de limitação	N	N	N	M	M	M	N	N	N	MF	MF	MF	F	F	F
Grupo e classe de aptidão agrícola	1A	1B	1C	2a	2b	2c	1A	1B	1C	-	4(p)	-	3(a)	4(p)	-
Aptidão final							A -	B 4(p)	C -						
Perfil 3															
Grau de limitação	N	N	N	M	M	M	N	N	N	F	M/F ₁	M ₂	M	M	M
Grupo e classe de aptidão agrícola	1A	1B	1C	2a	2b	2c	1A	1B	1C	3(a)	4(P)	-	1A	2b	3(c)
Aptidão final							A 3(a)	B 4(P)	C -						
Perfil 4															
Grau de limitação	N	N	N	M	M	M	N	N	N	F	M/F ₁	M ₂	M	M	M
Grupo e classe de aptidão agrícola	1A	1B	1C	2a	2b	2c	1A	1B	1C	3(a)	4(P)	-	1A	2b	3(c)
Aptidão final							A 3(a)	B 4(P)	C -						

Legenda: N=nulo; M=moderado; F=forte; MF=muito forte.

5. CONCLUSÕES

O relevo se destacou como fator determinante para o grau de pedogênese e para a variação de atributos nos perfis estudados.

Destacam-se como principais processos pedogenéticos específicos os de: carbonatação, melanização, eluviação e iluviação.

Quanto à avaliação da aptidão agrícola das terras, a susceptibilidade a erosão e os impedimentos a mecanização/cultivo foram os principais fatores limitantes. Portanto, a utilização das terras deve considerar esses aspectos, sendo recomendada a recomposição da paisagem nas condições de topografia mais declivosa e, preferencialmente, o emprego de sistemas agroflorestais e/ou integração pecuária floresta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. Domínios morfoclimáticos e solos do Brasil. In: ALVAREZ, V.V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F.; editores. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 1996. p.1-18.
- ACOCELLA, A.; TURRINI, D. Travertino di siena. Sienese Travertine. Toscana, 2010.
- ALBUQUERQUE, J.A.; ARGENTON, J.; FONTANA, E.C.; COSTA, F.S. & RECH, T.D. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 1065-1073, 2001.
- DE ALMEIDA, J.A; RIBEIRO, C.F.; OLIVEIRA, M.V.R.; SEQUINATTO, L. Mineralogia da argila e propriedades químicas de solos do Planalto Norte Catarinense. Revista de Ciências Agroveterinárias, v. 17, n. 2, p. 267-277, 2018.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 2, p.141-149, 2014.
- ANDRADE, G.R.P. Gênese de argilominerais em solos de manguezais brasileiros. 2015. 170 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- ANJOS, L.H.; FERNANDES, M.R.; PEREIRA, M.G.; FRANZMEIER, D. P. Landscape and pedogenesis of na Oxisol-Inceptisol-Ultisol sequence in Southastern Brazil. Soil Science Society os America Journal, 1998.
- ÁVILA, F. F. DE. Análise da cobertura pedológica em uma topossequência na Bacia do Córrego das Pereiras - depressão de Gouveia/MG. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de geociências. Programa de pós-graduação em geografia. Dissertação. 2009.
- BATISTA, I.; CORREIA, M.E.F.; PEREIRA, M.G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J.A.; MELLO, N.A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. Semina: Ciências Agrárias, v. 34, n. 4, p. 1535-1548, 2013.
- BICALHO, K. V.; LOSS, C., CASTELLO, R. R. Avaliação das características de plasticidade e compactação de misturas de argila-areia. In: COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade, 2010.
- BRADY, N.C. & WEIL, R.R. The nature and properties of soils. 11.ed. New Jersey: Prentice-hall, 1996. 740p.
- BRASIL. Lei 12.651/2012. Código Florestal Brasileiro [online]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acessado em; agosto de 2023.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 617-30, 2010.

CAMPOS, ROGERIO C.; DEMATTÊ, J. A.M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 853-863, 2004.

CARVALHO, W.A. Relações entre o relevo e solos da bacia do Rio Capivara – município de Botucatu, SP. 1981. 193 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1981.

CAVALCANTI, B. M.; SOARES, J. A.; CAZARIN, C. L. Petrofísica de rochas carbonáticas da formação Jandaíra, 2013.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima: Itaperuna – RJ, 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/itaperuna-4041>. Acesso em: ago. 2023.

CORRÊA, M. M.; KER, J.C.; MENDONÇA, E.S.; RUIZ, H.A.; BASTOS, R.S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 311-324, 2003.

CPRM. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Programa Geologia do Brasil. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br>. Acesso em: jun. 2023

CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 1984. 346p.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C. A. (ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v. 1, cap. 9, p. 545-567.

DEMATTÊ, J. L. I.; VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. Influência da drenagem na morfogênese de solos desenvolvidos de rochas básicas no município de Piracicaba (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 16, p. 241-247, 1992.

DEMATTÊ, J.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. *Bragantia*, v. 62, p. 451-464, 2003.

DE MORAES BRANCO, P. *Dicionário de mineralogia e gemologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

DUCHAUFOR, P. *Pedology: pedogenesis and classification*. London: George Allen & Unwin, 1982.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREZ, D. V.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*, v. 67, p. 429-439, 2008.

FANNING, S. D.; FANNING, M. C. B. *Soil genesis, morphology and classification*. New York: John Wiley & Sons, 1989. p. 69-80.

FERREIRA, E. P.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; CIPRIANO-SILVA, R.; AZEVEDO, A. C. Genesis and classification of soils containing carbonate on Chapada do Apodi, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, 2016.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; BENITES, V. M. Distribution of organic carbon in the humic fractions of diagnostic horizons from Brazilian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 39, n. 1, p. 1-21, 2008.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D.; BENITES, V. D. M. Classificação de horizontes diagnósticos minerais em níveis hierárquicos inferiores com base nas frações húmicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35 p. 313-324, 2011.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; SANTOS, A. C.; BERNINI, T. A. Matéria orgânica de horizontes superficiais em topossequeências em ambiente de Mar de Morros, Pinheiral, RJ. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 221-229, 2014.

FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C.; SHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 171-205.

FONSECA, M. J. G. Departamento de Produção Mineral. Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro. 1998.

GOLDSCHIEDER, N.; CHEN, Z.; AULER, A.S.; BAKALOWICZ, M.; BRODA, S.; DREW, D.; HARTMANN, J.; JIANG, G.; MOOSDORF, N.; STEVANOVIC, Z.; VENI, G. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*, v. 28, n. 5, p. 1661–1677, ago. 2020.

GOOGLE. Google Earth website. Disponível em: <http://google.com.br/earth/>. Acessado em: junho de 2024.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. São Paulo: Bertrand, 1994.

HARDT, R. Aspectos da morfologia cárstica da Serra do Calcário – Cocalinho – MT. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

HEILBRON, M.; SOARES, A.C.P.; CAMPOS, N.; SILVA, L.C.; TROUW, R.; JANASI, V. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D.R BRITO NEVES, B.B. (Orgs.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda., 2004. v. 1, p. 203-234.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: Itaperuna, RJ. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/itaperuna>. Acessado em: março de 2023.

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

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 107-138.

LEPSCH, I. F. 19 Lições de Pedologia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

LIMA, L. A. M. Produção de Calcário no Estado do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MARANHÃO, D. D. C. Gênese, Caracterização e Comparação de Métodos Analíticos de Solos de Natureza Calcária do Grupo Bambuí, no Estado do Tocantins. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014. 138 p.

MARQUES, R. A. Evolução Metamórfica do Terreno Oriental da Faixa Ribeira entre Italva e Bom Jesus de Itabapoana, noroeste de RJ. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. 180 p.

MEDEIROS, P.S.C., NASCIMENTO, P.C., INDA, A.V., SILVA, D.D. Caracterização e classificação de solos graníticos em topossequência na região Sul do Brasil. *Ciência Rural*, v. 43, p. 1210-1217, 2013.

MEIRELES, H.T., MARQUES JÚNIOR, J., CAMPOS, M.C.C., PEREIRA, G.T. Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, p. 129-136, 2012.

MELO, T. R.; RENGASAMY, P., FIGUEIREDO, A.; de CESARE BARBOSA, G.M.; TAVRES FILHO, J. A new approach on the structural stability of soils: Method proposal. *Soil Tillage Research*, v. 193, p. 171-179, 2019.

MELO, V. F.; WYPYCH, F. Caulinita e haloisita. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (eds.). Química e mineralogia do solo, Parte I – Conceitos gerais. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 427-504.

MORELLI, M.; FERREIRA, E. B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 11, p. 1-6, 1987.

MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 799-806, 1999.

NAVARRO, G. R. B.; LEME, T.G. Livro de referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: Filossilicatos. TECTOSSILICATOS. Museu de Minerais, Minérios e Rochas, 2017.

NELSON, W. L.; MEHLICH, A.; WINTERS, E. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. In: PIERRE, W. H.; NORMAN, A. G. (eds.). Soil fertilizer phosphorus. New York: Academic Press, 1953. p. 153-188. (Agronomy, 14).

NOGUEIRA, J.R., TUPINAMBÁ, M., GONTIJO, A., PALERMO, N., MENESES, P.T., HEILBRON, M., SOUZA, A.M., SILVA, T.M., ALMEIDA, J., SILVA, L.G.E., LAVERIANO, C.M., DUARTE, B., SCHMITT, R., VALLADARES, C.S., RAGATKY, C.D., GERALDES, M., VALENTE, S. C., PORTO, R., BARBOSA, M., PEIXOTO, C., MEDEIROS, S.R., VAZ, G.S., NETO, C., PEREIRA, R.M., GUIMARÃES, P.V., SILVA, F. L. Geologia e recursos minerais da folha São Fidélis SF. 24-V-C-IV, Estado do Rio de Janeiro, escala 1:100.000. CPRM, 2012. 108 p.

OLIVEIRA, J. A influência do relevo como fator de formação de solos: uma análise na área da Embrapa, Sete Lagoas MG. Revista Geonorte, v. 5, n. 21, p. 1-4, 2014.

OLSEN, S. R. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington: USDA, 1954. 22 p. (USDA. Circular, 939).

PAIVA, A. Q. Solos Carbonáticos-Fosfáticos do platô de Irecê, BA: Gênese, mineralogia e geoquímica. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

PEREIRA, M. G.; dos ANJOS, L.H.C.; PINHEIRO JUNIOR, C. R., PINTO, L. D. S., DA SILVA NETO, E. C., & FONTANA, A. Formação e caracterização de solos. In: TULIO, L. (Org.). Formação, classificação e cartografia dos solos. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. p. 1-20.

PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A. Caracterização e classificação de solos de natureza calcária da Serra da Bodoquena, MS. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31., 2009, Fortaleza. Anais: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. CD-ROM.

PEREIRA, M. G., SCHIAVO, J. A., FONTANA, A., DIAS NETO, A. H., & MIRANDA, L. P. M. D. Caracterização e classificação de solos em uma topossequência sobre calcário na Serra da Bodoquena, MS. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 997-1008, 2013.

PINHEIRO JUNIOR, C.R. Gênese e caracterização de solos de natureza carbonática do grupo Italva, RJ. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. 57f.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, M. G., DE AZEVEDO, A. C., VAN HUYSSTEEN, C., DOS ANJOS, L. H. C., FONTANA, A.; SILVA NETO, E.C.; VIEIRA, J.N., SANTOS, T.G. Genesis and classification of carbonate soils in the State of Rio de Janeiro, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 108, p. 103183, 2021.

PINTO, L. A. S. R., SILVA, C.F.D.; MELO, T.R.D., ROSSET, J.S.; PEREIRA, M.G. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 46, 2022.

PRESS, F.; SILVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. Para entender a terra. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2006. 656 p.

RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. *Bragantia*, v. 32, n. único, p. 337-347, 1973.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RAMOS, L. A., NOLLA, A., KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., & CAMARGO, M. S. D. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 849-857, 2006.

SANTOS, DARLISSON MEDEIROS; DA CONCEIÇÃO, OTÁVIO PRATES. Métodos de extração de fósforo. *Revista GeTeC*, v. 7, n. 19, 2018.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., ARAÚJO FILHO, J.C., CUNHA, T.J.F., OLIVEIRA, J.B. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa do Solo, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018. 212p.

SANTOS, R.D., LEMOS, R.C., SANTOS H.G., KER, J.C., ANJOS, L.H.C., SHIMIZU, S.H. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 7ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 100p.

SHINZATO, E. O carste da área de produção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação de solo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 1998.

SILVA, A. C., TORRADO, P.V., PÉREZ, M.G., NETO, L.M., VASQUEZ, F.M. Relações entre matéria orgânica do solo e declividade de vertentes em topossequência de Latossolos do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 5, p. 1059-1068, 2007

SILVA, A.S., SILVA, I.F., BANDEIRA, L.B., DIAS, B.O., NETO, L.F.S. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. *Ciência rural*, v. 44, p. 1783-1789, 2014.

SILVA, D. L. A. Solos e gênese da cerosidade numa topossequência com baixa a alta atividade da fração argila. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 118 f.

SILVA, M.B., ANJOS, L.H.C., PEREIRA M.G., NASCIMENTO, R.A.M. Estudo de topossequência da várzea litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n. 5, p. 965-976, 2001.

SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; FERNANDES, J. C. F. Gênese e estabilidade de agregados sob diferentes coberturas vegetais, Pinheiral-RJ. In: SANTOS, M. C. R. M.; PANZA, C. G. O.; RODRIGUES, W. C. (Orgs.). II Simpósio de Pesquisa em Mata Atlântica. Engenheiro Paulo de Frontin, RJ: FFP-UERJ, 2012. p. 72-74.

SOKOLOV, I. A. The Paradigm of pedology from Dokuchaev to the present day. *Eurasian Soil Science*, v. 29, p. 222-232, 1996.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy. Washington, DC: USDA Natural Resources Conservation Service, 1998.

SUGUIO, K. Geologia sedimentar. São Paulo: Blucher, 2003.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, 2017. 573p.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: DECIFRANDO a terra. p. 139-166, 2000.

TUCKER, M. E.; WRIGHT, V. Carbonate Sedimentology. Oxford: Blackwell Science Publication, 1990.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; BENITES, V.M.; EBELING, A.G.; MOUTA, R.O. Humic substance fractions and attributes of Histosols and related high organic-matter soils from Brazil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 38, p. 763–777, 2007.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 213-223, 2011.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R.E.; WILLIAMS, W.T.; HIGNETT, C.T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. Soil Research, v. 21, n. 1, p. 15-32, 1983.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 19, 1988.