

UFRRJ

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-

CIÊNCIA DO SOLO

TESE

**Estoques de Carbono e Nitrogênio e Frações
Húmicas em Solos com Elevados Teores de Matéria
Orgânica na Parte Alta do Parque Nacional de
Itatiaia (RJ)**

Melania Merlo Ziviani

2024



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

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E FRAÇÕES HÚMICAS
EM SOLOS COM ELEVADOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA
NA PARTE ALTA DO PARQUE NACIONAL DE ITATIAIA (RJ)**

MELANIA MERLO ZIVIANI

*Sob a orientação da Professora
Lúcia Helena Cunha dos Anjos*

*e Coorientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira*

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Julho 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)

Z64e

Ziviani, Melania Merlo, 1991-

Estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em solos com elevados teores de matéria orgânica na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (RJ) / Melania Merlo Ziviani.

- Seropédica, 2024.

85 f. : il.

Orientadora: Lúcia Helena Cunha dos Anjos.

Coorientador: Marcos Gervasio Pereira.

Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024.

1. Horizontes hísticos. 2. FPT. 3. Organossolos. 4. Frações húmicas. 5. Carbono labil. I. Anjos, Lúcia Helena Cunha dos, 1957-, orient. II. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo. IV. Título.

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 24 / 2024 - CPGACS (12.28.01.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.040570/2024-41

Seropédica-RJ, 07 de agosto de 2024.

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

MELANIA MERLO ZIVIANI

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

TESE APROVADA EM 24/07/2024.

Lúcia Helena Cunha dos Anjos. Dr. UFRRJ
(Orientadora)

Erica Souto Abreu Lima. Dra. UFRRJ
Walbert Júnior Reis dos Santos. Dr. IFSULDEMINAS
Ademir Fontana. Dr. EMBRAPA
Fabiano de Carvalho Balieiro. Dr. EMBRAPA

(Assinado digitalmente em 07/08/2024 19:00)
ERICA SOUTO ABREU LIMA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1412091

(Assinado digitalmente em 07/08/2024 16:35)
LÚCIA HELENA CUNHA DOS ANJOS
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO
CoordCGGA (12.28.01.00.00.00.15)
Matrícula: 387335

(Assinado digitalmente em 20/08/2024 15:48)
FABIANO DE CARVALHO BALIEIRO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 021.549.027-40

(Assinado digitalmente em 08/08/2024 14:20)
WALBERT JÚNIOR REIS DOS SANTOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 075.261.686-21

(Assinado digitalmente em 25/09/2024 14:04)
ADEMIR FONTANA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 024.908.059-16

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 24, ano: 2024, tipo: HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO, data de emissão: 07/08/2024 e o código de verificação: 97ea94fdf3

DEDICATÓRIA

*À Ana Maria, Natália e Luiz que nunca deixaram de acreditar em mim e nos
meus sonhos.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À minha família que eu escolhi e tenho construído nos últimos anos, Natália, Marx, Ororo, Hashi e Cleiton. E à minha família de sangue Ana, Romélio e Valentin.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por todos esses anos de muito aprendizado profissional e pessoal.

Aos meus orientadores Lúcia Anjos e Marcos Gervasio Pereira pelo apoio, suporte e inspiração.

Aos colegas de laboratório Luiz, Amanda, Lucielle, João, Rafael, Tiago e Francisco.

À todos os professores pelo conhecimento transmitido a mim.

Aos meus amigos da vida Pedro, Maria e Steven que sempre estarão no meu coração. E aos meus amigos nerds, Flávia, André, Isabela, Lygia e Lidiana por todo o carinho.

À banca avaliadora, pela disponibilidade de tempo e atenção.

Ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia - Ciência do Solo que foram fundamentais para a elaboração dessa tese.

Ao Parque Nacional de Itatiaia pelo fornecimento do material utilizado na pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa e à Faperj pelo auxílio financeiro concedido durante todos os anos de desenvolvimento dessa pesquisa.

E à todos que de alguma forma me deram suporte emocional, financeiro e físico para a realização do sonho de me tornar doutorada. Muito obrigada!

BIOGRAFIA

Graduada em Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) formada em 2017. Foi bolsista do Pibic, trabalhando de 2015 a 2016 com caracterização dos compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção de colheita da cana-de-açúcar. Atuou como estagiária no Laboratório de Ciclagem de Matéria Orgânica da UFRRJ entre os anos de 2015 à 2017. Mestra pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo (PPGA - CS) da UFRRJ onde trabalhou com solos da Amazônia Central avaliando os estoques e mecanismos de estabilização de carbono e nitrogênio dos compartimentos ativos e passivos da matéria orgânica do solo como parte do projeto Mapeamento Digital de Solos em Áreas de Exploração e Produção de Óleo e Gás - Estudos de caso dos campos do Norte e do Nordeste Brasileiro em Convênio entre PETROBRAS/FAPUR/UFRRJ-LASA (Laboratório de Água e Solos em Agroecossistemas). Doutorado no mesmo programa de pós-graduação com a sua pesquisa na avaliação de estoques de C e N e substâncias húmicas em solos com altos teores de matéria orgânica na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (RJ).

RESUMO GERAL

Ziviani, Melania Merlo. **Estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em solos com elevados teores de matéria orgânica na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (RJ).** 2024. 85f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (PNI) são encontrados solos com elevados teores de matéria orgânica nos horizontes superficiais, muitos deles classificados como Organossolos e outras classes com horizontes hísticos, no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Esses solos apresentam elevada fragilidade ambiental diante de alterações climáticas e ações antrópicas. O objetivo geral do estudo foi estimar estoques de C e N em solos com alto teor de matéria orgânica, bem como avaliar frações orgânicas da MOS, e propor critérios relevantes para diferenciar esses solos e classificá-los em níveis taxonômicos inferiores no SiBCS. No primeiro capítulo foram avaliados horizontes superficiais de solos com altos teores de matéria orgânica, objetivou-se: i) utilizar funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas por Beutler et al. (2017) para estimar a densidade do solo (Ds); e ii) avaliar os estoques de C e N desses solos. No segundo capítulo foram avaliados perfis de Organossolos visando: i) quantificar os teores de carbono orgânico lável nos horizontes orgânicos; ii) quantificar os teores de C e N das substâncias húmicas (SH); iii) avaliar as relações entre o C e N das SH com base na razão estequiométrica (C/N); e iv) propor critérios de classificação para os níveis categóricos inferiores dos Organossolos Fólicos e Háplicos no SiBCS. Os resultados no Capítulo I mostraram conteúdo de C entre 50 a 150 g kg⁻¹ e de N superiores a 10,0 g kg⁻¹ nos solos. Para a Ds foi observado incremento em profundidade, com valores próximos a 0,50 Mg m⁻³ nos horizontes superficiais e maiores que 0,75 Mg m⁻³ a partir dos 30 cm de profundidade no perfil. As FPTs (Beutler et al., 2017) permitiram estimar a Ds nas amostras de horizontes, desta forma, foi possível quantificar os estoques de C e o N nos solos estudados na parte alta do PNI. Considerando a área ocupada pelas três ordens de solos com horizontes hísticos na parte alta do PNI (Costa, 2019) de 16.403,7 hectares, os estoques de C alcançam valores de cerca de 3.269,9 Gg de C e 204,3 Gg de N. Desta área total, 10.254,44 ha correspondem aos Cambissolos, com estoque de 830,4 Gg de C e 53,1 Gg de N. Para os Organossolos, a área ocupada é de 4.148,4 ha e o estoque de 2.241,9 Gg de C e 13,78 Gg de N. A área de Neossolos é de 1347,7 ha e foi quantificado o estoque de 196,6 Gg de C e 13,4 Gg de N. Os resultados obtidos no capítulo II, mostraram ampla variação nos teores de C e N total desses solos. Os índices das relações entre o C e N das frações de ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF) (médias de CAH/CAF = 1,61 e NAH/NAF = 1,05), C e N do extrato alcalino e humina (HUM) (médias de CAE/CHUM = 0,71 e NEA/NHUM = 0,38), C e N do extrato alcalino e C total e N total (médias de CEA/CT = 0,28 e NEA/NT = 0,19) mostraram-se bons indicadores do grau de humificação da MOS. Este resultado indica que podem ser adotados na definição de classes no nível de família em Organossolos Fólicos e Háplicos no SiBCS, por terem uma relação direta com propriedades químicas desses solos. Da mesma forma, esses indicadores são recomendados para avaliar o grau de mineralização ou humificação da matéria orgânica desses solos podendo contribuir para o monitoramento de processos de alteração diante de mudanças climáticas ou ações antrópicas e para preservação desses solos. Estes resultados ressaltam a importância da proteção desses solos para a unidade de conservação (PNI) e pelos serviços ecossistêmicos prestados.

Palavras-chave: Horizontes hísticos. FPT. Organossolos. Frações húmicas. Carbono lável. SiBCS.

GENERAL ABSTRACT

Ziviani, Melania Merlo. **Stocks of carbon and nitrogen and humic substances in soils with high levels of organic matter in the upper part of Itatiaia National Park (RJ).** 2024. 85p. Thesis (Doctor in Agronomy-Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

In the upper part of the Itatiaia National Park (INP), soils with high organic matter content are found in the surface horizons, many of which are classified as *Organossolos* (equivalent to Histosols) and other classes with histic horizons in the Brazilian Soil Classification System (SiBCS). These soils show high environmental fragility in the face of climate change and anthropic actions. The general objective of the study was to estimate C and N stocks in the soils with high organic matter content, as well as to evaluate the organic fractions of SOM, and to propose criteria to differentiate these soils and to classify them in lower taxonomic levels of the SiBCS. In the first chapter, surface horizons of soil classes with high organic matter content were evaluated, aiming to: i) use the pedotransfer functions (PTFs) developed by Beutler et al. (2017) to estimate the bulk density (Bd); and ii) evaluate the C and N stocks of these soils. In the second chapter, profiles of *Organossolos* (Histosols) were evaluated aiming to: i) quantify the labile organic carbon content in the organic horizons; ii) quantify the C and N contents of the humic substances (HS); iii) evaluate the relationships between C and N of the HS based on the stoichiometric ratio (C/N); and iv) propose soil classification criteria for the lower categorical levels of *Organossolos Fólicos* and *Hápicos* in the SiBCS. The results obtained in Chapter I showed C content between 50 to 150 g kg⁻¹ and N content higher than 10.0 g kg⁻¹ in the soils. For Bd, an increase with profile depth was observed, with values close to 0.50 Mg m⁻³ in the surface horizons and greater than 0.75 Mg m⁻³ from 30 cm depth. The PTFs (Beutler et al., 2017) allowed estimating Ds in the horizon samples, thus making it possible to quantify the C and N stocks in the soils studied in the upper part of the PNI. Considering the area occupied by the three soil orders with histic horizons in the upper part of the PNI (Costa, 2019) of 16,403.7 hectares, the C stocks reach values of about 3,269.9 Gg of C and 204.3 Gg of N. Of this total area, 10,254.44 ha correspond to *Cambissolos* (Inceptisols), with a stock of 830.4 Gg of C and 53.1 Gg of N. For *Organossolos*, the area is of 4,148.4 ha and the stock 2,241.9 Gg of C and 13.78 Gg of N. The area of *Neossolos* (Entisols) is 1,347.7 ha and the stock was quantified at 196.6 Gg of C and 13.4 Gg of N. The results obtained in Chapter II showed a wide variation in the total C and N contents of these soils. The indices of the relationships between C and N of the humic acid (HA) and fulvic acid (FA) fractions (mean CAH/CAF = 1.61 and NAH/NAF = 1.05), C and N of the alkaline extract and humin (HUM) (mean CAE/CHUM = 0.71 and NEA/NHUM = 0.38), C and N of the alkaline extract and total C and total N (mean CEA/CT = 0.28 and NEA/NT = 0.19) proved to be good indicators of the degree of SOM humification. This results show that they could be adopted as to define classes at the family level in the SiBCS, for *Organossolos Fólicos* and *Hápicos*, as they have a direct relationship with the chemical properties of these soils. Similarly, these indicators are recommended to evaluate the degree of mineralization or humification of the organic matter of these soils, which can contribute to monitoring alteration processes in the face of climate change or anthropic actions and to preserving these soils. These results highlight the importance of protecting these soils for the conservation unit (PNI) and for the ecosystem services they provide.

Keywords: Histic horizons. PTF. Histosols. Humic fractions. Labile carbon. SiBCS.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Número (n), frequência (%) e área ocupada por perfis com horizontes hísticos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.....	22
Tabela 2 Aplicação das funções de pedotransferência (FPT) segundo Beutler et al. (2017) para a obtenção da densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) de cada horizonte em perfis com horizontes hísticos no Parque Nacional de Itatiaia.....	26
Tabela 3 Estoques de carbono e nitrogênio em perfis com horizontes hísticos encontrados na parte superior do Parque Nacional de Itatiaia.....	33
Tabela 4 Perfis de Organossolos na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia e a formação geológica sob as quais foram formados (Costa, 2019).	47
Tabela 5 Atributos químicos dos horizontes superficiais dos perfis de Organossolos da parte alta do PNI.....	48
Tabela 6 Carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) do solo e teores de carbono (CAF, CAH e CHUM) e nitrogênio (NAF, NAH e NHUM) das frações húmicas e carbono orgânico lável (POXC) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI.....	51
Tabela 7 Índices húmicos obtidos a partir da quantificação dos teores de C e N das frações húmicas da MOS em amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.....	54
Tabela 8 Relações entre C e N do solo (C/N) e das frações húmicas do solo (AF-C/N, AH-C/N e HUM-C/N) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI.....	56
Tabela 9 Valores dos autovetores das variáveis na análise de componentes principais (ACP) em amostras de perfis de Organossolos Fólicos (OO) e Háplicos (OX) para as dimensões 1 e 2 (Dim1 e Dim2), na parte alta do PNI.....	58
Tabela 10 Valores dos autovetores das variáveis na análise de componentes principais (ACP) em amostras dos Organossolos Fólicos Sápicos (OOs) e Organossolos Fólicos Hêmicos (OOr) para as dimensões 1 e 2 (Dim1 e Dim2), na parte alta do PNI.....	61
Tabela 11 Matriz de correlação de Pearson entre as frações orgânicas (valores quantitativos e qualitativos) e os atributos químicos e físicos de amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.....	64
Tabela 12 Comparações dos atributos do solo a partir da classificação proposta pela relação AEC/TC e HUM-C/N para amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI..	66
Tabela 13 Proposta de classificação para quinto nível categórico de Organossolos no SiBCS, conforme os grupos obtidos com a análise de Cluster e a relação entre extrato alcalino das substâncias húmicas e o carbono total do solo.....	68

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Distribuição em profundidade das variáveis pH, H₊Al (cmolc dm⁻³), soma de bases (SB) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CTC) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm⁻³), saturação por bases (V%), carbono (C) (g C kg⁻¹ de solo), nitrogênio (N) (g C kg⁻¹ de solo), relação C:N (C/N), densidade do solo (Ds) (Mg m⁻³) e estoques de carbono (estoqueC) (Mg ha⁻¹) e nitrogênio (estoqueN) (Mg ha⁻¹) dos horizontes dos perfis de Neossolos, Cambissolos e Organossolos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia..... 24
- Figura 2** Variação dos estoques de carbono e nitrogênio (30 cm) em perfis com horizontes hísticos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia. 32
- Figura 3** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H₊Al (cmolc dm⁻³), soma de bases (SB) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm⁻³), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg⁻¹), nitrogênio (N) (g kg⁻¹), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m⁻³) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha⁻¹) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha⁻¹), de perfis com horizontes hísticos (Cambissolos, Neossolos e Organossolos) encontrados no Parque Nacional de Itatiaia.. 34
- Figura 4** Percentual da variância geral explicada para cada dimensão da análise de componentes principais (ACP) das 13 variáveis avaliadas (A) e variáveis mais significativas para a CP1 e CP2 (B) e CP1, CP2 e CP3 (C). 35
- Figura 5** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H₊Al (cmolc dm⁻³), soma de bases (SB) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm⁻³), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg⁻¹), nitrogênio (N) (g kg⁻¹), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m⁻³) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha⁻¹) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha⁻¹) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Cambissolos coletados no Parque Nacional de Itatiaia.. 36
- Figura 6** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H₊Al (cmolc dm⁻³), soma de bases (SB) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm⁻³), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg⁻¹), nitrogênio (N) (g kg⁻¹), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m⁻³) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha⁻¹) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha⁻¹) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Neossolos coletados no Parque Nacional de Itatiaia .. 37
- Figura 7** Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H₊Al (cmolc dm⁻³), soma de bases (SB) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm⁻³), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm⁻³), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg⁻¹), nitrogênio (N) (g kg⁻¹), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m⁻³) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha⁻¹) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha⁻¹) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Organossolos coletados na do Parque Nacional de Itatiaia. 38
- Figura 8** Box plot das variáveis carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono lável (POXC), carbono do ácido fúlvico (CAF), carbono do ácido húmico (CAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), nitrogênio do ácido húmico (NAH) e nitrogênio da humina (NHUM) em amostras de perfis de Organossolos do PNI.....52

- Figura 9.** Percentual de carbono não humificado (%CNH) e das frações húmicas (%CAF, %CAH e %CHUM) em relação ao carbono total do solo em amostras de Organossolos no Parque Nacional de Itatiaia. Percentual de nitrogênio não humificado (%NNH) e das frações húmicas (%NAF, %NAH e %NHUM) em relação ao carbono total do solo em amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI53
- Figura 10** Relações entre C e N do solo (C/N) e das frações húmicas do solo (AF-C/N, AH-C/N e HUM-C/N) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI56
- Figura 11** Análise de componentes principais das variáveis carbono lábil (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fulvico (CAF), nitrogênio do ácido fulvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fulvico (AF-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N), relação C/N da humina (HUM-C/N) e relação entre as frações CAH/CAF, CEA/CHUM, CEA/CT, NAH/NAF, NEA/NHUM, NEA/NT em amostras de perfis de Organossolos Fólicos – OO – (A) e Organossolos Háplicos – OX – (B), na parte alta do PNI.....59
- Figura 12** Análise de componentes principais das variáveis carbono lábil (POXC), carbono total (TC), nitrogênio total (TN), carbono do ácido fulvico (FAC), nitrogênio do ácido fulvico (FAN), carbono do ácido húmico (AHC), nitrogênio do ácido húmico (AHN), carbono da humina (HUMC), nitrogênio da humina (HUMN), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fulvico (FA,C/N), relação C/N do ácido húmico (AH,C/N), relação C/N da humina (HUM,C/N) e relação entre as frações AHC/FAC, AEC/HUMC, AEC/TC, AHN/FAN, AEN/HUMN, AEN/TN de amostras de perfis de solos classificados como Organossolos Fólicos Sápricos – OO – (A) e Organossolos Fólicos Hêmicos – OOy – (B), na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.62
- Figura 13** Análise de Cluster das amostras dos perfis de Organossolos observados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia conforme as variáveis: Carbono lábil (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fulvico (CAF), nitrogênio do ácido fulvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fulvico (FA-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N) e relação C/N da humina (HUM-C/N)63

LISTAS DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS OU SÍMBOLOS

Mg	Megagrama
Gg	Gigagrama
AF	Ácido fúlvico
AH	Ácido húmico
HUM	Humina
CT	Carbono total
NT	Nitrogênio total
CAF	Carbono do ácido fúlvico
NAF	Nitrogênio do ácido fúlvico
CAH	Carbono do ácido húmico
NAH	Nitrogênio do ácido húmico
CHUM	Carbono da humina
NHUM	Nitrogênio da humina
%CAF	porcentagem de carbono da fração AF em relação ao CT do solo
%NAF	porcentagem de nitrogênio da fração AF em relação ao NT do solo
%CAH	porcentagem de carbono da fração AH em relação ao CT do solo
%NAH	porcentagem de nitrogênio da fração AH em relação ao NT do solo
%CHUM	porcentagem de carbono da fração HUM em relação ao CT do solo
%NHUM	porcentagem de nitrogênio da fração HUM em relação ao NT do solo
%CNH	porcentagem de carbono não humificado em relação ao CT do solo
%NNH	porcentagem de nitrogênio não humificado em relação ao NT do solo
AF-C/N	Relação entre os conteúdos de carbono e nitrogênio do AF
AH-C/N	Relação entre os conteúdos de carbono e nitrogênio do AH
HUM-C/N	Relação entre os conteúdos de carbono e nitrogênio da HUM
C/N	Relação entre os conteúdos de carbono e nitrogênio do solo
CAH/CAF	Relação entre os conteúdos de carbono dos AH e AF
CEA	Soma dos conteúdos de carbono das frações AF e AH
NEA	Soma dos conteúdos de nitrogênio das frações AF e AH
NAH/NAF	Relação entre os conteúdos de nitrogênio dos AH e AF
CEA/CHUM	Relação entre os conteúdos de carbono do EA e HUM
NEA/NHUM	Relação entre os conteúdos de nitrogênio do EA e HUM
CEA/CT	Relação entre os conteúdos de carbono do EA e do solo
NEA/NT	Relação entre os conteúdos de nitrogênio do EA e do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1 Pressão Antrópica sobre a Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Mudanças Climáticas	3
2.2 Dinâmica da MOS e Importância do Estoque de C em Solos Frágeis	4
2.2.1 Caracterização geral da MOS e seus compartimentos	4
2.2.2 Fatores e mecanismos de estabilização de C no solo	4
2.2.3 Estoques de C em solos frágeis	5
2.3 Funções de Pedotransferência para Predição da Ds e Estoques de C e N	7
2.4 Organossolos: Distribuição, Gênese e Classificação.....	10
2.5 Áreas Altomontanas e Solos Orgânicos	12
3 CAPÍTULO I: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA AVALIAÇÃO DE ÁREAS MONTANHOSAS FRÁGEIS: ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM MONTANHAS DO SUDESTE DO BRASIL	14
3.1 RESUMO	15
3.2 ABSTRACT	16
3.3 INTRODUÇÃO.....	17
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.4.1 Amostragem e caracterização dos solos	19
3.4.2 Determinação da densidade do solo (Ds)	19
3.4.3 Estoques de C e N	20
3.4.4 Análises estatísticas	20
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.5.1 Caracterização dos perfis de solos.....	22
3.5.2 Avaliação da densidade do solo	25
3.5.3 Estoques de C e N	31
3.5.4 Análise de componentes principais	34
3.6 CONCLUSÕES	40
4 CAPÍTULO II: FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E CLASSIFICAÇÃO DE ORGANOSSOLOS NO PARQUE NACIONAL DE ITATIAIA	41
4.1 RESUMO	42
4.2 ABSTRACT	43
4.3 INTRODUÇÃO.....	44
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
4.4.1 Meio físico e coleta de amostras	47
4.4.2 Frações químicas da matéria orgânica do solo	48
4.4.3 Análises estatísticas	50
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.6 CONCLUSÕES	69
5 CONCLUSÕES GERAIS	70
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel fundamental como reservatório de vários nutrientes com destaque para o carbono (C) e nitrogênio (N), cruciais para regular o clima e sustentar as funções ecossistêmicas do solo. O carbono orgânico é acumulado no solo devido a ação de agentes e processos transformadores sobre os resíduos vegetais e animais, conhecidos como fatores e mecanismos de estabilização. Os fatores que regulam carbono orgânico no solo são clima, material de origem do solo, vegetação, organismos que inclui a ação antrópica (uso e manejo do solo) e o tempo. E os principais mecanismos de estabilização são a associação química do carbono orgânico com as estruturas dos colóides minerais do solo, a sua própria recalcitrância e a formação de agregados onde o material orgânico é protegido fisicamente do ambiente externo. É importante ressaltar que a MOS é um componente complexo sendo os mecanismos e fatores de estabilização da mesma variáveis conforme as condições ambientais, principalmente de umidade e temperatura, e a biodiversidade do solo.

O carbono orgânico total do solo (COT) reflete a soma dos conteúdos de C de todas as frações da MOS. Além destas frações, alguns minerais possuem carbono em sua composição química, como os carbonatos e bicarbonatos, sendo esse conteúdo, em geral, incluído no valor obtido no método de determinação do carbono total (CT) do solo. Ou seja, o COT é uma parte do CT. Compreender as interações entre os ciclos dos elementos e nutrientes e as mudanças climáticas globais é crucial para entender os mecanismos de retroalimentação que impulsionam as mudanças climáticas. O estudo dessas relações é essencial para prever cenários climáticos futuros e desenvolver estratégias eficazes para mitigar os impactos das mudanças climáticas no ciclo de C e N nos ecossistemas.

As mudanças climáticas podem influenciar diretamente no ciclo do C, em especial nas taxas de fotossíntese, respiração e decomposição. Temperaturas mais elevadas aceleram os processos de decomposição, liberando maior quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Alterações nos padrões de precipitação afetam o crescimento das plantas e a umidade do solo, influenciando a sequestro de carbono na vegetação e nos solos, onde, com mais chuva favorecerá o estabelecimento das plantas acelerando as transformações químicas e biológicas do material orgânico do ambiente. Distúrbios como incêndios florestais e desmatamentos liberam grandes quantidades de carbono do solo para a atmosfera, contribuindo ainda mais para acelerar os processos citados. Para o ciclo do N, as mudanças climáticas também podem afetar a sua disponibilidade e perdas nos ecossistemas. Aumentos de temperatura e mudanças na precipitação influenciam assim na atividade microbiana e as taxas de mineralização do nitrogênio nos solos, afetando a disponibilidade de nitrogênio para o crescimento das plantas e a produtividade dos ecossistemas. Além disso, a deposição de N de fontes atmosféricas pode ser alterada pelas mudanças climáticas, afetando o ciclo de nutrientes e a sua dinâmica.

Os parques nacionais e demais Unidades de Conservação (UCs) desempenham papel crucial na mitigação das mudanças climáticas globais e na conservação da biodiversidade, além de sequestro de nutrientes da atmosfera e barreiras naturais para o avanço do desmatamento. O Parque Nacional de Itatiaia (PNI) é o primeiro parque nacional criado no Brasil, datado do ano de 1937 e administrado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

(ICMBio). O PNI está localizado na Serra da Mantiqueira, entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, onde abriga rica biodiversidade de fauna e flora típicas da Floresta Atlântica e dos Campos de Altitude.

Devido à grande variação de altitude observada no PNI (600 metros a 2.791 metros), o seu território é dividido em parte alta e parte baixa. A parte baixa é coberta por formações florestais, em vários estágios de regeneração, e nela se localiza a sede do parque. A parte alta possui como diferencial a presença da vegetação de campos de altitude, constituída de espécies adaptadas às condições ambientais extremas, de pequeno porte, resistentes ao frio, vento e escassez de água por período longo de tempo, além de maior tolerância à radiação ultra violeta. Essas espécies estão distribuídas entre os afloramentos rochosos e vales estreitos suspensos, em subambientes com condições variáveis de umidade e topografia, dentro da paisagem altomontana.

Na parte alta do PNI são encontrados solos com elevados teores de matéria orgânica nos horizontes superficiais, incluindo solos classificados como Organossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, Santos et al., 2018) e outras ordens com horizontes hísticos (Costa, 2019), cuja formação é favorecida pelas condições ambientais específicas da vegetação de campos de altitude e do microclima na parte alta do PNI. Sabendo que as transformações que ocorrem na MOS estão relacionadas com as condições ambientais (especialmente umidade e temperatura) e que o planeta Terra passa por eventos decorrentes de mudanças climáticas em escala global, temos como pergunta para esse estudo, como avaliar o grau de fragilidade dos solos estudados no PNI perante essas alterações e como podemos monitorar o seu efeito?

Considerando as mudanças climáticas e seu potencial impacto sobre os campos de altitude e os solos na parte alta do PNI, o objetivo geral do estudo foi estimar estoques de C e N em solos com alto teor de matéria orgânica, bem como a avaliação das frações orgânicas da MOS, e propor critérios que possam ser relevantes para diferenciar esses solos quanto a sua fragilidade ambiental e utilizados para classificar esses solos no SiBCS.

No primeiro Capítulo I intitulado “Funções de pedotransferência na avaliação de áreas montanhosas frágeis: estoques de carbono e nitrogênio em montanhas do sudeste do Brasil” foram avaliados horizontes superficiais de várias classes de solos com altos teores de matéria orgânica, objetivou-se: i) utilizar as funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas por Beutler et al. (2017) para estimar a densidade do solo (Ds) dos horizontes superficiais; e ii) avaliar os estoques de carbono (C) e o nitrogênio (N) de solos. No segundo capítulo “Frações químicas da matéria orgânica do solo e classificação de Organossolos no PNI” foram avaliados perfis de Organossolos (16) visando: i) quantificar os teores de carbono orgânico lável nos horizontes orgânicos; ii) quantificar os teores de C e N das substâncias húmicas (SH); iii) avaliar as relações entre o C e N das SH com base na razão estequiométrica (C/N); e iv) propor critérios de classificação de solos para os níveis categóricos inferiores dos Organossolos Fólicos e Háplicos no SiBCS.

2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1 Pressão Antrópica sobre a Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Mudanças Climáticas

A pressão exercida sobre o planeta Terra e sua biodiversidade pelo crescimento populacional e expansão urbana sobre áreas naturais tem ocasionado extinção de espécies (flora e fauna) e poluição de vários sistemas naturais e aumento da desertificação, com riscos para a segurança alimentar das populações, pela redução da qualidade nutricional e mudança de dieta, além de produção de alimentos e degradação dos solos. Garantir que todas as pessoas se alimentem de forma segura e que os serviços prestados pelo meio ambiente sejam preservados tornou-se obrigação das sociedades atuais e futuras (FAO, 2020).

A pressão antrópica sobre os sistemas naturais afeta diretamente o ciclo do C no planeta Terra. Esse elemento está ligado a inúmeros processos ecológicos em diversos ecossistemas como, por exemplo, no fluxo de gases para a atmosfera, cujo aumento favorece o aquecimento global. A maior compreensão da dinâmica e de como esse elemento pode ser estocado no solo tornou-se um caminho importante a ser desbravado, em que medidas podem ser tomadas a partir do entendimento da função do solo na dinâmica do C (IPCC, 2007; Medeiros, 2019).

Processos de longa e curta duração são observados no ciclo do C no planeta Terra. Esses processos evidenciam o papel do solo na dinâmica do C, como importante reservatório e possuindo relação direta com as concetrações de gases emitidos para a atmosfera que favorecem o efeito estufa. O conteúdo de C no solo é quase duas vezes superior ao observado nas diversas vegetações e três vezes maior que o da atmosfera (IPCC, 2014). Portanto os processos de adição (fotossíntese e deposição de material orgânico) e perdas (mineralização, lixiviação e erosão) de material orgânico resultam no favorecimento ou desfavorecimento do armazenamento do C no solo (Kuhry & Vitt, 1996; Bragazza et al., 2009).

O C ocorre em diferentes formas no ambiente, sendo ainda mais influenciado pelas condições ambientais quando está na forma de MOS. As mudanças climáticas afetam a dinâmica da matéria orgânica através do favorecimento ou não da sua decomposição. Ambientes com altas temperaturas e maior disponibilidade hídrica propiciam a intensa ciclagem do material orgânico, devido ao estabelecimento de organismos que utilizam esse material como fonte de energia e podem permitir melhor desenvolvimento das plantas (Alves et al., 2011). A temperatura do ambiente e a umidade do solo interagem concomitantemente sobre a decomposição da MOS, sendo importantes os estudos que se dedicam ao entendimento dessa relação (Keuskamp et al., 2013).

O manejo adequado do solo e o planejamento de sua ocupação possibilitam o aumento dos estoques de C e outros nutrientes no solo reduzindo as emissões GEE, além da melhoria dos seus atributos físicos, químicos e biológicos e de funções importantes, tais como o armazenamento de água (FAO, 2017). É importante ressaltar que o acúmulo ou perda do C e outros nutrientes é influenciado pela adoção ou não de práticas de manejo sustentáveis, que devem ser adequadas a cada ambiente (Pauštian et al., 2019). O não planejamento do uso dos solos intensifica a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera devido a emissão de C e outros elementos, que podem afetar a temperatura média anual do planeta. Já se observa um aumento de 2 °C comparado à década de 60 do século XX e a previsão é de que até 2100 seja registrado um aumento de 4 °C nas médias anuais (Allen et al., 2014). Além disso, registrou-se aumento de 0,5% a 1% na precipitação anual média a cada 10 anos (Griggs &

Noguer, 2010; OFIPCC, 2013; Greve et al., 2014). Koven et al. (2017) previram que o efeito dessas mudanças sobre o ciclo do C no ambiente pode resultar em perdas de 12,2-112,6 Pg de C para a atmosfera.

2.2 Dinâmica da MOS e Importância do Estoque de C em Solos Frágeis

2.2.1 Caracterização geral da MOS e seus compartimentos

A matéria orgânica do solo apresenta função importante na prestação de serviços ecossistêmicos pelo solo, relacionada com a melhoria das condições edáficas. O conteúdo de MOS é resultado da deposição de resíduos orgânicos que, ao longo tempo, são transformados através da ação de organismos. Esse processo de transformação da MOS é influenciado por alguns fatores externos (Jenny, 1994) que afetam as taxas de entrada de C nos solos e os seus mecanismos de estabilização. Devido a possibilidade de inúmeras combinações de condições às quais a MOS pode estar submetida é importante estudar não somente a quantidade de estoque de C pelo solo, mas também que fatores condicionam a sua maior estabilidade.

Devido à grande variedade de materiais orgânicos que podem ser depositados no solo, a MOS pode ser diversificada quanto a sua composição, estruturas e grau de estabilidade. Além disso, a partir do momento em que é utilizada pelos microrganismos, sob diferentes condições ambientais, se originam diferentes formas e estágios de transformação.

Alguns modelos teóricos foram desenvolvidos para tentar explicar as transformações e a formação da MOS. Os principais são os Modelos Century (Parton et al., 1987), RothC (Rothamsted Carbon Model) (Jenkinson & Rayner, 1977), DNDC (DeNitrification-DeComposition) (Li et al., 1992), CQESTR (Liang et al., 2009) e APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) (Keating et al., 2003). De uma forma geral, esses modelos de compartmentalização da MOS separam as frações orgânicas do solo a partir da sua localização no solo e fatores e mecanismos aos quais esse material orgânico é submetido.

Considerando o modelo Century (Parton et al., 1987) os compartimentos da MOS são divididos em ativos, lentos ou intermediários e os compartimentos passivos. Esses diferentes compartimentos se diferenciam quanto a rotatividade da matéria orgânica no solo. As frações mais estáveis estão associadas aos compartimentos passivos, que podem conter material quimicamente recalcitrante ou fisicamente protegido, com um longo tempo de reciclagem (200 a 500 anos). O compartimento lento pode apresentar produtos microbianos e vegetais, que são fisicamente protegidos ou biologicamente resistentes à decomposição, com tempo de reciclagem intermediário (20 a 40 anos). As frações mais lábeis são associadas aos compartimentos mais ativos, como a biomassa microbiana e seus produtos, com tempo de reciclagem curto (1 a 5 anos).

Ao avaliar os diferentes compartimentos de MOS, percebe-se que o material orgânico pode ser mais ou menos suscetível aos processos de humificação ou mineralização. Em geral, é quantificado através do conteúdo de carbono nos compartimentos da MOS, visando interpretar qual o processo predominante, se o da humificação ou o da mineralização.

2.2.2 Fatores e mecanismos de estabilização de C no solo

A compartmentalização da MOS informa sobre a estabilização do C. Os fatores e

mecanismos de estabilização de C no solo estão diretamente ligados com o acúmulo de carbono e, consequentemente, permitem inferir sobre práticas para mitigar emissões de C sobre a forma de gases do efeito estufa para a atmosfera. Os processos que atuam sobre esses compartimentos se dão de forma contínua e específica sendo coincidentes com os fatores de formação do solo (relevo, clima, vegetação, material de origem e clima) (Stevenson, 1982). Esses fatores podem ser muito amplos e variáveis, uma vez que os ambientes terrestres se encontram sob diferentes combinações destes.

Além dos fatores que interferem na estabilização do C, há também os mecanismos atuando em cada um dos compartimentos da MOS (Sollins et al., 1996). Os principais mecanismos de estabilização de C nos solos podem ser classificados como: recalcitrância do material orgânico, proteção química e proteção física. Além desses mecanismos sugeridos por Sollins et al. (1996), alguns fatores podem contribuir na estabilização da MOS. Entre os exemplos, a acidez do meio e a condição de hidromorfia que influenciaam negativamente a atividade de organismos decompositores, que são importantes no processo de transformação do material orgânico (Hank & Dick, 2019).

A recalcitrância do material orgânico é uma propriedade química inerente das moléculas em resistir a transformações (Sollins et al., 1996; Kleber, 2010). A recalcitrância tem papel relevante na estabilização da MOS por contribuir na preservação dos compostos orgânicos do solo e por representar a imagem momentânea do ambiente (Maia et al., 2013).

O mecanismo de proteção química afeta a interação dos compostos orgânicos com a superfície mineral que pode variar com a mineralogia dos solos devido aos diferentes grupos funcionais das suas superfícies (Wattel-Koekkoek et al., 2001; Kleber et al., 2007; Mikutta et al., 2007; Dick et al., 2009). Esse mecanismo de proteção da MOS depende também da textura do solo, saturação por bases, potencial redox, entre outros fatores (Sposito, 1989). Esses fatores interagem de maneira complexa para influenciar a proteção química da MOS. Solos com alta proporção de argila, ricos em óxidos de ferro e alumínio, e com alta saturação por bases são mais eficazes na proteção da MOS, promovendo a formação de complexos estáveis e reduzindo a decomposição microbiana.

De maneira geral, o material orgânico pode se ligar a superfície dos colóides minerais do solo através de trocas catiônicas ou aniônicas, ponte catiônica, troca de ligantes e formação de complexos de coordenação de esfera interna, ligação de hidrogênio etc. (Chorover & Amistadi, 2001; Dick et al., 2009). Esses mecanismos tem papel de destaque, especialmente em horizontes subsuperficiais dos solos, como mostrado por Von-Lutzow et al. (2006).

O mecanismo de proteção físico é resultante do aprisionamento da MOS durante a formação de agregados do solo. A matéria orgânica fica oclusa em seu interior permitindo que o carbono não esteja disponível ao seu consumo dos microrganismos (Oades & Waters, 1991; Golchin et al., 1994; Six et al., 2002; Six et al., 2004).

2.2.3 Estoques de C em solos frágeis

Solos frágeis, segundo Castro & Hernani (2015), são solos que apresentam características intrínsecas particulares como, por exemplo, menor aptidão agrícola, maior suscetibilidade a erosão e menor resiliência. As suas propriedades químicas, físicas e biológicas tornam-se peças-chaves nessa definição e a MOS desempenha função singular na melhoria dessas propriedades. Quando submetidos a práticas de uso e manejo inadequadas a capacidade

de prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos desses solos é afetada e por isso torna-se necessária a elaboração de estratégias especiais de manejo e conservação para o uso sustentável desses solos (Costa et al., 2020; Turetta et al., 2017).

Ecossistemas montanhosos ocupam cerca de 12% da superfície do planeta Terra (Körner & Basler, 2010) e abrigam 25% de toda a diversidade biológica global (Spehn et al. 2006). Essa biodiversidade é resultante não somente da altitude, mas também da topografia e condições geológicas e edáficas as quais estão submetidas, representando ambiente extremamente complexo (Körner et al., 2005; Cingolani et al. 2003; Gallardo-Cruz et al. 2009). Esses ambientes são tidos como frágeis pela forte ocorrência de endemismo de espécies de fauna e flora e a alta susceptibilidade à degradação de seus solos, em geral rasos, muitas vezes ácidos e de menor disponibilidade de nutrientes.

A forte influência da altitude na riqueza de espécies e diminuição da diversidade florestal em solos de florestas do Himalaia é apontada por Sheikh et al. (2009), bem como em solos sob florestas tropicais do sul do Equador. Esse fenômeno é influenciado por fatores ambientais (temperatura do ar e do solo e precipitação) e fisiológicos (fotossíntese) que afetam a produtividade líquida de fitomassa. As espécies desenvolveram adaptações anatômicas, morfológicas, fisiológicas e reprodutivas para essas condições (Porembski e Barthlott, 2000).

Elevadas altitudes também são associadas a afloramentos rochosos com alta exposição solar, aos ventos, maior déficit hídrico e alta erodibilidade (Safforde & Martinelli 2000; Szarzynski 2000). Assim, os solos formados próximos a esses afloramentos rochosos são rasos, com menores conteúdos de argila e sua fertilidade é, em geral, limitada por baixos teores de P e N (Porembski & Barthlott 2000; Benites et al. 2007), e outros nutrientes. Os solos em ambientes de altitude estão dispostos em função de padrões de relevo lcoais que contribuem na condensação orogênica das massas de umidade interceptadas, dando origem a microclima local, que é caracterizado por baixas temperaturas e alta umidade (Falkenberg, 2003). Nesses microclimas formam-se solos e ecossistemas específicos, em que é favorecido o acúmulo de MOS (Benites et al., 2005; Scheer et al., 2011) permitindo que o C seja imobilizado e preservado no solo (Simas et al., 2005; Benites et al., 2005; Benites et al., 2007).

As áreas montanhosas se mantêm preservadas devido à dificuldade de acesso, o que as tornam excelentes ambientes naturais para o estudo de dinâmica de matéria orgânica do solo. Mecanismos diferenciados de estoque de C podem ser observados conforme a variação altitudinal e condições edafoclimáticas em que, de maneira geral, cotas até 1000 metros permitem maior adição de material orgânico e com isso o consumo mais acelerado dos compartimentos mais ativos da MOS. Em cotas mais elevadas a matéria do solo apresenta caráter mais estável, com menores entradas de material fresco resultando na persistência do material no solo (Medeiros, 2019). Os estoques de C no solo representam excelente ferramenta no monitoramento da capacidade de armazenamento de C por esse reservatório.

O sequestro de C pelo solo varia conforme os diferentes solos e seus usos, topografia, vegetação e o clima. O potencial de estoque e estabilização de C em cada zona altitudinal em ambientes de montanha permite identificar as mais importantes quanto ao estoque de C para que possa desenvolver políticas para proteção dessas áreas. Estudos em ambientes de altitudes acima de 2000 metros (Sheikh et al., 2009; Soethe et al., 2008; Looby et al., 2016) mostram que o estoque de C nos solos reduz com o aumento da altitude, porém observou-se maior

estabilidade dos compartimentos da MOS conforme esse aumento. Isso é justificado pelos autores devido as restrições ecofisiológicas imposta à vegetação conforme o aumento de altitude. Segundo os autores, a maior altitude influencia a composição das espécies vegetais e o suprimento de material orgânico ao solo. Quanto mais alta menor a temperatura e sua influência na mineralização do C permitindo a permanência da matéria orgânica no solo, porém o suprimento de material orgânico fresco é bem inferior ao observado em regiões mais baixas.

O Estado do Rio de Janeiro encontra-se inserido totalmente no Bioma Mata Atlântica e atualmente somente 20% do território do estado é destinado para UCs de diferentes categorias. A variação altitudinal observada no estado é proveniente do soerguimento das cadeias de montanhas das serras do Mar e da Mantiqueira (Caminhos Geológicos, 2013). Uma das principais UCs no estado é o Parque Nacional de Itatiaia (PNI), que está localizado entre as duas maiores metrópoles do Brasil, Rio de Janeiro e São Paulo (Costa, 2019). O parque possui papel muito importante na produção de água e na preservação da fauna e flora, com espécies endêmicas nos seus ambientes altitudinais.

Na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia, são formados Organossolos, influenciados por hidromorfismo nos vales estreitos, e solos rasos com horizontes hísticos próximos as encostas escarpadas, além da contribuição da vegetação de campos de altitude para os elevados teores de MOS (Soares et al., 2016; Costa., 2019).

2.3 Funções de Pedotransferência para Predição da Ds e Estoques de C e N

As funções de pedotransferências (FPT) são ferramentas importantes para a avaliação e modelagem dos fenômenos que ocorrem no solo. Estas funções podem ser obtidas a partir de modelos matemáticos baseados em atributos edáficos de fácil obtenção (Andrade et al., 2020), permitindo dinamizar e otimizar as avaliações de atributos de difícil obtenção. A densidade do solo (Ds) é um atributo físico que apresenta grande variabilidade espacial e sua quantificação apresenta caráter desafiador para a ciência do solo (Makovníková et al., 2017). A Ds está relacionada com a composição do solo (mineral e orgânica) e com a organização das partículas no solo, formando agregados ou não, que irá influenciar diretamente nas trocas gasosas, na resistência ao desenvolvimento do sistema radicular, na circulação da água no solo e na intensidade do processo erosivo, entre outros. Adicionalmente, mas não isoladamente, através da avaliação da Ds pode se inferir sobre os níveis de compactação ou adensamento do solo.

Solos com horizontes de constituição orgânica apresentam vários problemas para a determinação da Ds. Além dos que ocorrem em outros solos, relacionados aos métodos de coleta pouco representativos devido à dificuldade de se manter o arranjo natural das partículas do solo, também existem problemas nos solos com altos teores de matéria orgânica na conversão dos valores de massa do solo em volume, o que é essencial na mensuração dos estoques de nutrientes como C e N (Beutler et al., 2017). Assim, o uso de FPTs é uma alternativa para a quantificação indireta (predição ou estimativa) da Ds em solos orgânicos e solos com horizontes hísticos.

Na literatura, ainda são poucos os estudos para determinar FPTs que permitem estimar os valores de Ds para cálculo dos estoques de nutrientes do solo, uma vez que estes dependem de bancos de dados com grande número de informações para boa acurácia. Ainda, a eficácia da FPT pode ser específica para um dado ambiente ou conjunto de classes de solo, mas alguns trabalhos são aqui citados (Curtis & Post, 1964; Adams, 1973; Saini, 1996; Jeffrey, 1970;

Honeyset & Ratkowsky , 1989; Manrique & Jones, 1991; Tamminen & Starr, 1994; Heuscher et al., 2005; Keller & Hakansson, 2010; Suuster et al., 2011; Boschi et al., 2015). No Brasil, Reis et al. (2024) abordaram a predição da Ds de solos brasileiros utilizando FPT hierárquicas. Os autores observaram uma ligeira melhoria na precisão da predição da Ds quando frações de areia grossa e fina, além de carbono orgânico, foram incluídas como preditores junto com silte e argila. O estudo destaca a importância de considerar diferentes granulometrias do solo e conteúdos de carbono orgânico para melhorar a precisão das predições de Ds em solos brasileiros.

Estudos que desenvolveram FPT para solos com horizontes com elevados conteúdos de C são ainda mais escassos. Neste sentido destaca-se o trabalho de Beutler et al. (2017), em que os autores desenvolveram duas FPTs para prever a Ds em horizontes orgânicos de solos no Brasil. As funções desenvolvidas por Beutler et al. (2017) foram construídas especificamente para solos que apresentassem quantidades de C orgânico maiores que 80 g kg⁻¹ de solo.

O desenvolvimento de FPTs para regiões montanhosas é pouco abordado em literatura. Carvalho Junior et al. (2013) desenvolveram FPTs para estimar a Ds de regiões tropicais montanhosas a partir de atributos de solos encontrados nas análises de perfis de solos em levantamento realizado no município de Bom Jardim, no Rio de Janeiro. Os atributos utilizados para a construção das FPTs foram: densidade das partículas; teores de calhaus, cascalho, terra fina, areia grossa, areia fina, silte, argila, argila dispersa em água; grau de floculação; relação silte/argila; valores de pH em água e KCl, Ca+Mg, potássio, sódio, Valor S, alumínio, hidrogênio, Valor T, Valor V%, saturação por alumínio e fósforo; valores de carbono orgânico, nitrogênio e relação C/N; ainda os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e valores de Ki, Kr e da relação Al₂O₃/Fe₂O₃.

Os autores (Carvalho Junior et al., 2013) desenvolveram modelos com diferentes conjuntos de dados, ao todo foram elaboradas 12 FPTs sendo 6 modelos baseados em Regressão linear múltipla (RLM) com "stepwise regression" e 6 empregando Random Forest (RF). As covariáveis com melhor desempenho no método RF para estimar Ds, foram COT, H⁺, areia fina e grossa, valor V e valor T; e no método de RLM as covariáveis mais importantes foram relação silte/argila, areia grossa e fina, COT, valor V e potássio. Através da aplicação da função "stepwise" foi possível reduzir o número de variáveis preditoras às mais significativas e construir a FPT2, a que melhor estimou a Ds utilizando 12 variáveis (calhaus, silte, relação silte/argila, pH em água e em KCl, Valor V%, fósforo, carbono orgânico, dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), dióxido de titânio (TiO₂) e potássio e tendo o menor erro padrão residual (0,105). Porém, mesmo utilizando a função "stepwise" para diminuir o número de variáveis preditoras ele ainda permanece alto e algumas destas variáveis não são analisadas rotineiramente (SiO₂, Al₂O₃ e TiO₂).

No trabalho de Benites et al. (2006), que desenvolveu procedimento estatístico para prever Ds em solos brasileiros, em vários biomas, a partir de propriedades do solo de fácil obtenção é reportado o valor médio de Ds para os solos do Brasil de 1,36 Mg m⁻³, variando entre 0,13 e 2,25 Mg m⁻³. Para esses autores os atributos teor de argila, COT e soma de bases puderam descrever 66% da variação da Ds nos perfis avaliados.

Pádua et al. (2015) desenvolveram FPTs capazes de estimar os valores de Ds até um metro de profundidade em áreas de vegetação nativa das regiões central e sul de Minas Gerais.

Os modelos matemáticos foram baseados em propriedades químicas e na granulometria de perfis das classes Latossolos, Cambissolos, Nitossolos e Argissolos. As variáveis COT, areia, silte, argila e valor T apresentaram maior relevância para os modelos construídos e foram obtidas também através da função “*stepwise*”. As variáveis preditoras COT, areia, silte, argila e T foram mais eficientes na determinação da Ds para os perfis das classes Latossolos (R^2 ajustado = 0,85), seguida por Cambissolos (R^2 ajustado = 0,69), Nitossolos (R^2 ajustado = 0,67) e Argissolos (R^2 ajustado = 0,51). A Ds de perfis sob vegetação nativa variou entre 0,66 e 1,74 kg dm⁻³. Avaliando os perfis da classe dos Cambissolos a Ds estimada variou de 1,06 ± 0,16 kg dm⁻³ na camada de 0-5 cm a 1,34 ± 0,17 kg dm⁻³ para a camada de 90 a 100 cm de profundidade.

FPT para estimar a Ds usando o algoritmo Random Forest calibrado a partir dos dados de solo e dados ambientais obtidos da base de dados National Cooperative Soil Survey (NCSS) e National Soil Information System (NASIS) dos Estados Unidos foi desenvolvida por Ramcharan et al. (2018). Também foram usados dados de camadas ambientais (U.S. Geological Survey, 2015), da classificação nacional de cobertura do solo (Homer et al., 2015), 19 índices climáticos desenvolvidos pelo USGS (O'Donnell e Ignizio, 2012) e classificações hierárquicas de ecossistemas terrestres (Bailey, 1983). Para selecionar o modelo final, as variáveis estudadas foram agrupadas em diferentes combinações até que não houvesse melhoria no erro de previsão do modelo. Os valores de Ds estimados a partir da FPT, desenvolvida pelo autor citado, foram avaliados calculando o MPE (Erro de previsão médio) e o RMSPE (Erro de previsão de raiz quadrada média). Os estoques de C do solo foram estimados usando COT, Ds estimada a partir da FPT desenvolvida, espessura do horizonte e a porcentagem de fragmentos grossos (>2mm).

A FPT com melhor desempenho foi implementada usando oito variáveis de solo e duas variáveis ambientais (Ramcharan et al., 2018). Esse modelo de dez variáveis explicou 66,7% da variância do conjunto de dados (RMPSE = 0,13 Mg m⁻³ e MPE = -0,001 g cm⁻³). Das 10 variáveis, 6 foram extraídas da base de dados do NCSS (COT, teor de areia, teor de argila, profundidade do solo, pH, tipo de horizonte) e 2 da base de dados NASIS (tipo e tamanho da estrutura do solo). O uso dessas oito propriedades do solo no modelo de RF explicou 56,6% (RMSPE = 0,14 g cm⁻³, MPE = -0,002 g cm⁻³) da variância do conjunto de dados. As duas variáveis ambientais incluídas nas dez variáveis PTF foram: materiais superficiais e diferentes ecorregiões. Independente das propriedades do solo, essas duas variáveis ambientais explicaram 23,6% (RMSPE = 0,23 Mg m⁻³, MPE = -0,001 Mg m⁻³) da variância do conjunto de dados no modelo de RF. Os estoques estimados de C do solo tiveram RMSPE médio de 0,36 Mg C ha⁻¹ e MPE de 0,06 Mg C ha⁻¹. A FPT desenvolvida por Ramcharan et al. (2018) mostrou-se eficiente na obtenção de dados de Ds faltantes do banco e dados e para o cálculo de estoques de C do solo.

Para estimar Ds em solos da Amazônia Central no Brasil, Gomes et al. (2017) desenvolveram FPTs através de regressão linear múltipla, comparando o desempenho de FPTs gerados com três outros modelos usados para estimar Ds em solos da região amazônica (Bernoux et al., 1998; e Benites et al., 2007). Os autores quantificaram o efeito da aplicação desses FPTs nos mapas de variabilidade espacial do estoque de C orgânico do solo. As FPTs geradas por Gomes et al. (2017) objetivavam estimar a Ds para a profundidade total do solo, para horizontes superficiais e horizontes subsuperficiais, usando a função *stepwise*. Foram utilizados atributos preditores do solo encontrados em relatórios de levantamentos de solos, tais

como: C orgânico, pH em água, soma de bases, Al⁺³ e teor de argila.

O modelo criado por Gomes et al. (2017) para obtenção da Ds explicou 67% da variância e apresentou o menor valor de AIC (Akaike Information Criterion - Critério de Informação Akaike) com -1593,53 e o maior valor de R² com 0,667 (profundidade total do solo). Os resultados encontrados pelos autores mostram que a incerteza causada pela estimativa de Ds usando FPTs pode ser muito maior do que os valores reportados na literatura. As FPTs de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) superestimaram em 1,06 e 1,23 Mg C ha⁻¹ o estoque de C orgânico do solo, que representou 15% e 17%, respectivamente. Esse padrão significa que a aplicação da FPT para estimar Ds pode introduzir erro grande o suficiente para distorcer a diferença significativa na mudança do estoque de C do solo. Os autores recomendam que a FPT gerada somente deva ser usada em áreas da Formação Geológica Içá e em solos com cobertura de floresta.

Para comparação dos valores encontrados para solos brasileiros através do uso de FPTs com valores obtidos por análise de amostras de solos com altos teores de matéria orgânica, são citados alguns trabalhos. Valladares et al. (2008a) utilizaram a análise de componentes principais para comparar perfis de Organossolos quanto às suas semelhanças, baseando-se nos atributos morfológicos, físicos e químicos, e observaram para dois solos altimontanos valores de Ds dos horizontes hísticos no perfil localizado no Paraná (PR3) de 0,14 kg dm⁻³ e para o perfil no Rio de Janeiro (RJ1) de 0,54 a 0,96 kg dm⁻³. Soares et al. (2016) obtiveram valores de Ds em dois perfis de solos com horizontes orgânicos na parte alta do PNI variando de 0,54 Mg m⁻³ em horizontes superficiais até 1,17 Mg m⁻³ nos horizontes subsuperficiais (não orgânicos). Silva et al. (2009) também obtiveram valores baixos de Ds em solos com horizontes hísticos na Serra do Espinhaço em Minas Gerais, com valores que variaram entre 0,03 a 0,44 Mg m⁻³. Padrão similar foi observado por Carvalho Neto et al. (2018) para quatro perfis com horizontes orgânicos na parte alta do PNI, onde os valores de Ds variaram de 0,23 a 0,82 Mg m⁻³.

2.4 Organossolos: Distribuição, Gênese e Classificação

Avaliando a distribuição dos solos orgânicos no mundo, podemos observar sua ocorrência em diferentes ambientes, tais como: áreas úmidas (hidromórficas), turfeiras, manguezais e ambientes de montanhas. Embora ocupem pequenas extensões terrestres (aproximadamente 3% de área terrestre total) esses solos concentram grande quantidade de carbono orgânico no solo (cerca de 30% de todo o carbono estocado no solo) e desempenham papel muito importante no ciclo do carbono planetário (Joosten & Couwenberg, 2008). Segundo o manual técnico de práticas de manejo intitulado “Recarbonizando solos globais” (FAO, 2021), eles são encontrados em alguns ‘hot spots’ de armazenamento de carbono, que são definidos como pequenas áreas terrestres com capacidade de estocar quantidades altas de carbono de forma bastante efetiva.

No trabalho realizado por Canto et al. (2020) a área ocupada por solos com horizontes orgânicos corresponde a 0,11% do território nacional brasileiro (superior a 900 mil hectares); sendo 84% desse total representados por Organossolos, pouco mais de 15% por Gleissolos e 0,4% por outras classes de solos com horizontes hísticos ou do subgrupo organossólico. Quanto a sua relevância para estoque de carbono no solo, Valladares (2003a), estima que apenas os Organossolos sejam capazes de estocar uma média de 204 Mg ha⁻¹ de carbono até um metro de

profundidade para áreas tropicais e subtropicais.

O clima quente e úmido, predominante nas diversas regiões do Brasil, favorece as transformações da MOS, por isso solos com componentes hísticos são encontrados apenas em ambientes específicos que permitem que o material orgânico seja acumulado ao longo do tempo. Considerando as condições ambientais brasileiras esse acúmulo de material orgânico ocorre em locais de drenagem livre ou impedida resultando em horizontes superficiais nomeados como O (boa drenagem) ou H (mal/muito mal drenado) (Santos et al., 2018). Em geral, podemos encontrar esses solos em ambientes de montanhas, em baixadas interioranas e baixadas litorâneas, em clima tropical e maior expressão subtropical. Cada um desses ambientes apresenta sua própria dinâmica e, consequentemente, fatores e processos múltiplos e específicos de formação desses solos.

Na gênese dos solos orgânicos e de solos com horizontes superficiais de alto teor de matéria orgânica, os fatores material de origem e vegetação (organismos) estão estreitamente relacionados, uma vez que a vegetação é o principal fornecedor de material orgânico para esses solos. O tipo de vegetação e a velocidade de transformação desse material orgânico relaciona-se com o clima e relevo uma vez que eles serão determinantes na distribuição pluviométrica e drenagem dos ambientes (Garcia, 1996; Ebeling et al., 2008) e os organismos tem papel essencial na transformação do material adicionado pela vegetação. Portanto, as propriedades dos solos orgânicos possuem relação direta com a composição botânica da vegetação nesses ambientes em que são formados.

Quanto aos processos pedogenéticos específicos, para a formação de solos com predominância de material orgânico pode-se destacar a paludização para solos com influência do lençol freático por longos períodos (Fanning & Fanning, 1989; Schaetzl & Anderson, 2005; Kampf & Curi, 2012). Esse processo ocorre devido a inibição da ação de organismos aeróbicos que realizam as transformações dos materiais orgânicos seja pela presença de água por longos períodos de tempos, acidez elevada, insuficiência de alguns nutrientes ou a presença excessiva de toxinas orgânicas ou sais (Dick et al., 2019). Quanto aos solos orgânicos não afetados pelo lençol freático, normalmente encontrados em altas elevações o processo de formação se deve basicamente a deposição da liteira ("littering") (Kampf & Curi, 2012) e a sua preservação pela redução da atividade biológica devido as baixas temperaturas. O clima frio e úmido, o relevo e a vegetação são os principais fatores de formação desses solos como no sudeste do Brasil, essas condições incluem um clima úmido e frio, comum em altitudes elevadas, que favorece a acumulação de matéria orgânica. A vegetação das florestas e campos de altitude contribui significativamente para a deposição contínua de matéria orgânica, enquanto o relevo da região influencia a drenagem e a estabilização do material orgânico nos solos. onde há a redução da sua decomposição influenciando diretamente as propriedades físicas e químicas do solo (Silva Neto et al., 2024).

Quanto à classificação dos solos orgânicos, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018), de maneira geral, nos solos identificados na ordem dos Organossolos as propriedades do material orgânico devem ser preponderantes as propriedades do material mineral do solo. Segundo o SiBCS, os Organossolos “*são definidos como solos pouco evoluídos, com preponderância de características oriundas do material orgânico depositado ao solo, com coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada*

apresentando mais de 80 g kg⁻¹ de carbono orgânico na constituição dos seus horizontes diagnósticos e com espessura variável (20 a 60 cm)”. Além dos solos nessa ordem, horizontes hísticos, que são caracterizados no SiBCS por altos teores de matéria orgânica, são observados em outras ordens de solos, como os Neossolos, Cambissolos, Gleissolos.

2.5 Áreas Altomontanas e Solos Orgânicos

O termo altomontana é aplicado para identificar tipo de vegetação que ocorre em locais com mais de 1000 m de altitude. O termo é também utilizado para englobar paisagens com altitudes superiores a 1.000 metros, em que podem ocorrer as florestas ombrófilas densas altomontanas e os campos de altitude, estes a partir da cota dos 1.200 metros. Ambas as tipologias são observadas no PNI.

Os acúmulos de material orgânico em ambientes montanhosos se devem a alguns fatores ambientais específicos que favorecem a sua permanência no solo. As baixas temperaturas devidas as altas atitudes e as condições pluviométricas variáveis são os principais fatores de formação do solo que afetam a dinâmica do C orgânico nessas condições (Pereira et al., 2005; Silva Neto et al., 2023). Esses ambientes, em geral, são marcados por elevada acidez e distrofismo.

A principal forma de transformação de C em solos com altos teores de MOS em ambientes altomontanos é a mineralização, promovida por microrganismos como fungos e bactérias que utilizam o C do material orgânico depositado no solo como fonte de energia. As enzimas extracelulares produzidas por esses microrganismos quebram as ligações químicas mais complexas desses materiais orgânicos, como por exemplo celulose, em materiais com ligações químicas mais simples, como por exemplo a glicose, para que possam ser absorvidos via membrana plasmática pelos microrganismos. Quando esse processo ocorre parte do C presente nesses compostos é oxidado a dióxido de carbono (CO₂) (Dick et al., 2019).

Além disso, na maioria das vezes essas áreas são cobertas por vegetações naturais preservadas que adicionam continuamente biomassa ao solo como serapilheira. Essas áreas tornam-se relevantes pois os resíduos orgânicos não são inteiramente transformados no sistema e contribuem para ecossistemas por vezes únicos e endêmicos, além de sua participação na origem de bacias hidrográficas e, ainda, como registros paleoambientais. Esses solos atuam como arquivos naturais, preservando informações sobre a história da vegetação local. Por exemplo, análises de pólen e outros restos vegetais encontrados nas camadas do solo revelam mudanças na cobertura florestal e expansões de campos ao longo do tempo (Silva Neto et al., 2024). A melhor compreensão das mudanças na dinâmica da vegetação nesses ambientes auxiliam no entendimento desses locais destacando a importância de conservar esses solos para preservar a biodiversidade e a memória ambiental da região, além de apoiar pesquisas sobre seu papel no contexto ambiental global (Silva Neto et al., 2024).

Para as áreas montanhosas do Sudeste do Brasil, Silva Neto et al. (2023; 2024) destacam que durante os períodos mais frios e secos do passado, as formações campestres tendiam a se expandir, enquanto as florestas diminuíam. Em contraste, climas mais quentes e úmidos favoreceram o avanço das florestas e o recuo das áreas campestres. Segundo os autores, essas mudanças refletem o impacto de variações climáticas, como as ocorridas durante o Holoceno, e de fatores geomorfológicos que influenciam a estabilidade e o acúmulo da MOS.

Em regiões montanhosas o acúmulo do carbono é favorecido pela redução da atividade biológica nos processos de humificação e mineralização da MOS. Essa redução não está relacionada com a presença contínua de água por longos períodos, como nos solos hidromórficos, mas sim devido as baixas temperaturas que afetam negativamente a atividade enzimática dos microrganismos. A ação dos microrganismos é mais intensa sobre o material que apresenta as características estruturais semelhantes ao material orgânico fresco adicionado ao solo (Dick et al., 2019). Ao longo do tempo as estruturas mais recalcitrantes do material orgânico permanecem no solo sendo incorporadas as frações mais húmidas da MOS.

Em solos cultivados, as estimativas de emissão de CO₂ para a atmosfera normalmente são obtidas a partir da diferença de estoques nessas áreas cultivadas em relação a áreas de cobertura natural. Nas áreas naturais em ambiente altomontano, as mudanças de emissões de gases de efeito estufa estão atreladas a outros fatores que não a mudança de uso e cobertura do solo. As mudanças de temperatura global e mudanças pluviométricas, são fatores importantes a serem considerados para essas áreas, quanto a emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera.

Os esforços mundiais para a redução de emissão de GEE estão concentradas em pesquisas e discussões sobre o gerenciamento do carbono, com forte ligação com a criação de um inventário de emissões desses gases para a atmosfera. Entre as perguntas que devem ser respondidas estão as seguintes. Em áreas naturais, quais medidas devem ser tomadas para evitar a perda desse carbono? É um processo sem volta? Além de perda de C também estamos perdendo biodiversidade. Como nos adaptaremos a isso? Assim, a avaliação da natureza do material orgânico depositado no solo, a sua dinâmica de transformação a partir do entendimento da sua estrutura química e funcional, são pontos importantes para responde-las.

3 CAPÍTULO I:

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA AVALIAÇÃO DE ÁREAS MONTANHOSAS FRÁGEIS: ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM MONTANHAS DO SUDESTE DO BRASIL

Parte do Capítulo publicado em Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA

ZIVIANI, M. M.; COSTA, E. M.; ALVES, A. S.; PINTO, L. A. D. S. R.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. A. Pedotransfer Functions in the Assessment of Fragile Mountainous Areas: Carbon and Nitrogen Stocks in Mountains in Southeastern Brazil. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 8, p. e06052-e06052, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n8-018.

3.1 RESUMO

Solos com horizontes de constituição orgânica desempenham vários serviços ecossistêmicos, sendo que muitos desses solos estão em áreas de grande diversidade de espécies e ambientes específicos. Em função da importância destes solos, estudos devem ser realizados para maior compreensão da dinâmica dos seus atributos, entre eles os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N), e desta forma sejam desenvolvidas estratégias para a sua conservação. Para tal, é necessário quantificar além desses nutrientes (C e N) a densidade do solo (Ds). O que, em função do método para coleta de amostra indeformada e da grande variabilidade espacial da Ds é um processo difícil, especialmente em regiões montanhosas como a parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (PNI). Desta forma, outras técnicas devem ser utilizadas para obtenção da Ds, entre elas, as funções de pedotransferência (FPTs). Partindo da hipótese de que as FPTs podem ser utilizadas como ferramentas na predição da Ds e, portanto, quantificação de estoques de C e N, o estudo em solos na parte alta do PNI teve como objetivos: i) aplicar as FPTs construídas por Beutler et al. (2017) para estimar a densidade do solo (Ds); e ii) avaliar os estoques de C e N, a partir de dados legados Costa (2019). A partir de solos coletados e analisados por Costa (2019), foram selecionados 47 perfis, sendo 26 deles pertencentes a ordem dos Organossolos, 15 de Cambissolos e 6 de Neossolos, sendo separados 180 horizontes destes perfis para o estudo. Duas PTFs foram utilizadas, uma para os horizontes que apresentavam dados das variáveis preditoras conteúdos de argila e carbono (PTF1) e outra para horizontes em que foi quantificado apenas o C (PTF2). A partir dos valores preditos de Ds, que foram utilizados para completar dados ausentes, foram calculados os estoques de C e N. O estoque foi calculado por cada horizonte e ao final somados todos os valores para obter o estoque por perfil de solo, tomando-se os horizontes até a profundidade de 30 cm. Ao final, foi calculado o estoque para as classes de solos (Cambissolos, Neossolos e Organossolos, para a sua comparação. De maneira geral, destaca-se nos horizontes superficiais os altos conteúdos de C, variando entre 50 a 150 g kg⁻¹, com conteúdo de nitrogênio (N) superiores a 10,0 g kg⁻¹. Para a densidade do solo (Ds) observa-se incremento em profundidade, sendo os valores próximos a 0,50 Mg m⁻³ nos horizontes mais na superfície, aumentando para 0,75 Mg m⁻³ a partir dos 30 cm de profundidade. As FPTs (Beutler et al., 2017) permitiram estimar a Ds nas amostras de horizontes nos quais esse atributo não foi analisado anteriormente. Desta forma, foi possível quantificar os estoques de carbono (C) e o nitrogênio (N) nos solos estudados na parte alta do PNI, com a substituição de dados faltantes. Considerando a área ocupada pelas três ordens de solos com horizontes hísticos na parte alta do PNI (Costa, 2019) de 16.403,7 hectares, os estoques de C alcançam valores de cerca de 3.269,9 Gg de C e 204,3 Gg de N. Desta área total, 10.254,44 ha correspondem aos Cambissolos, com estoque de 830,4 Gg de C e 53,1 Gg de N. Para os Organossolos, a área ocupada é de 4.148,4 ha e o estoque de 2.241,9 Gg de C e 13,78 Gg de N. A área de Neossolos é de 1347,7 ha e foi quantificado o estoque de 196,6 Gg de C e 13,4 Gg de N. Os estoques médios de C nos perfis de Cambissolos são inferiores aos valores quantificados para os perfis de Organossolos, enquanto os Neossolos possuem os menores estoques. Apesar dos Cambissolos ocuparem área maior que os Organossolos, a capacidade de armazenar C e N dos solos orgânicos é muito superior; portanto, o estoque total de C total em toda a área de Organossolos é mais que duas vezes e meia o valor para os Cambissolos, com padrão semelhante para o N. Este resultado ressalta a importância da proteção desses solos para a unidade de conservação (PNI) e pelos serviços ecossistêmicos prestados.

Palavras-chave: Horizontes hísticos. Densidade do solo. Serviços ecossistêmicos. Solos de montanhas. Matéria orgânica. Estoques de nutrientes.

3.2 ABSTRACT

Soils with organic horizons perform various ecosystem services, and many of these soils are found in areas with high biodiversity and specific environments. Due to the importance of these soils, studies must be conducted to better understand the dynamics of their attributes, including carbon (C) and nitrogen (N) stocks, and thus develop strategies for their conservation. For that purpose, it is necessary to quantify bulk density (Bd) besides the contents of the nutrients C and N. This is a difficult process due to the method for collecting undisturbed samples and the high spatial variability of Bd, especially in mountainous regions such as the upper part of the Itatiaia National Park (PNI). Therefore, other techniques must be used to obtain the values of Bd, including pedotransfer functions (PTFs). Based on the hypothesis that PTFs can be used as tools in predicting Bd and, consequently, in quantifying C and N stocks, the study aimed to: i) apply the PTFs constructed by Beutler et al. (2017) to estimate bulk density (Bd); and ii) evaluate C and N stocks, based on legacy data from Costa (2019) of soils in the upper part of the PNI. From soils collected and analyzed by Costa (2019), 47 profiles were selected, 26 of which belonged to the order *Organossolos* (equivalent to Histosols), 15 to *Cambissolos* (Inceptisols), and 6 to *Neossolos* (Entisols), with 180 horizons from these profiles separated for this study. Two PTFs were used, one for horizons that had data on the predictor variables clay and carbon contents (PTF1) and another for horizons where only C was quantified (PTF2). C and N stocks were calculated from the predicted Ds values, which were used to complete missing data. The stock was calculated for each horizon and after that all values were summed to obtain the stock per soil profile, using the horizons up to a depth of 30 cm. Finally, the stock for soil classes (*Cambissolos*, *Neossolos* and *Organossolos*) was calculated for comparison. In general, the surface horizons have a high C content, ranging from 50 to 150 g kg⁻¹, with nitrogen (N) content exceeding 10.0 g kg⁻¹. The values of bulk density (Bd) increased with depth, with values close to 0.50 Mg m⁻³ in the surface horizons, increasing to 0.75 Mg m⁻³ from 30 cm depth. The PTFs (Beutler et al., 2017) allowed estimating Ds in horizon samples where this attribute had not been previously analysed. Thus, it was possible to quantify carbon (C) and nitrogen (N) stocks in the soils studied in the upper part of the PNI, with the replacement of missing data. Considering the area of 16,403.7 hectares (ha), occupied by the three soil orders with histic horizons in the upper part of the PNI (Costa, 2019), C stocks reach values of about 3,269.9 Gg of C and 204.3 Gg of N. Of this total area, 10,254.44 ha correspond to *Cambissolos*, with a stock of 830.4 Gg of C and 53.1 Gg of N. For *Organossolos*, the area occupied is 4,148.4 ha and the stock is 2,241.9 Gg of C and 13.78 Gg of N. The area of *Neossolos* is 1,347.7 ha and a stock of 196.6 Gg of C and 13.4 Gg of N was quantified. The average C stocks in *Cambissolos* profiles are lower than the values quantified for *Organossolos* profiles, while *Neossolos* have the lowest stocks. Although *Cambissolos* occupy a larger area compared to *Organossolos* in the upper part of the PNI, the capacity of organic soils to store C and N is much higher. Therefore, the total C stock in the entire area of *Organossolos* is more than two and a half times the value for *Cambissolos*, with a similar pattern for N. This result highlights the importance of protecting these soils for the conservation unit (INP) and the ecosystem services provided.

Keywords: Histic horizons. Bulk density. Ecosystem services. Mountain soils. Organic matter. Nutrient stocks.

3.3 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) realizou, em 2017, o Simpósio Global sobre Carbono do Solo (GSOC17), em Roma, com a publicação do documento “Destravando o potencial de carbono orgânico”. A partir deste relatório, a FAO produziu manual técnico de práticas de manejo recomendadas intitulado - Recarbonizando solos globais (FAO, 2021). Esse documento fornece visão geral dos *hot spots* de estoque de carbono orgânico do solo mais importantes no mundo e as principais práticas de gestão do solo que impactam positivamente o armazenamento de carbono orgânico e os serviços ecossistêmicos do solo.

Localizado na região sudeste do Brasil, o Parque Nacional de Itatiaia (PNI) se enquadra em dois *hot spots* abordados por esse manual: “*Mountain soils*” e “*Peatlands*”. Os solos encontrados em ambiente montanhoso, normalmente não foram submetidos a grandes impactos decorrentes das ações antrópicas, e em grande parte ainda possuem a cobertura vegetal natural ou com pequeno grau de modificação. Essas condições favorecem que os resíduos vegetais, e em especial a serapilheira, não sejam removidos do sistema permitindo que a decomposição ocorra de forma mais lenta e contribuindo para a manutenção dos nutrientes por mais tempo no sistema e adicionalmente promovendo melhoria em vários atributos do solo.

As áreas montanhosas do PNI se mantêm preservadas devido à dificuldade de acesso, o que as tornam excelentes ambientes naturais para o estudo da dinâmica da MOS e dos serviços ecossistêmicos prestados por esses solos, podendo ser citados os estoques de C e N, favorecimento de recarga de aquíferos e sua capacidade de tamponar elementos tóxicos (Simas et al., 2005; Benites et al., 2005; Benites et al., 2007; Weissert & Disney, 2013). Apesar de apresentarem elevado potencial de sequestro de C e N esses ambientes são extremamente frágeis. Estima-se que as concentrações de CO₂ atmosférico sejam duplicadas até o ano de 2100 resultando em mudanças nos ciclos hidrológicos e cobertura vegetal e aumento nas temperaturas médias (Long, 1991; Lloyd & Taylor, 1994; Sellers et al., 1997; Bernacchi et al., 2001). Essas mudanças podem afetar o intemperismo químico das rochas (Beaulieu et al., 2012) e também a decomposição da MOS desencadeando mudanças de dinâmica ambiental dos ambientes encontrados na parte alta do PNI.

Nas condições ambientais observadas na parte alta do PNI (altitude superior 1.600 m) os padrões de relevo podem contribuir para a condensação orogênica das massas de umidade interceptadas e o acúmulo de água, em partes baixas na paisagem regional, nas planícies fluviais (declividade inferior a 2%) (Falkenberg, 2003). Também são verificados depósitos de tálus associados com rampas deposicionais e fundos de vales (declividade entre 10 a 35%). Por outro lado, há afloramentos rochosos com alta exposição solar, ventos e déficit hídrico em determinadas épocas do ano com alta suscetibilidade a erosão servindo de fonte de material para os depósitos de tálus (declividade superior a 50%) (Safforde & Martinelli, 2000; Szarzynski, 2000). Nesses microclimas formam-se solos e ecossistemas específicos, nos quais é favorecido o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) em detrimento de sua transformação. A vegetação local apresenta um importante papel para o fornecimento ininterrupto do material orgânico permitindo que o C e o N sejam imobilizados e preservados

(Benites et al., 2005; Scheer et al., 2011) seja devido ao acúmulo de água, ou devido a baixas temperaturas ou ambos os casos associados (Benites et al., 2007; Hribljan et al., 2016).

Devido ao acúmulo de material orgânico no solo em ambientes de altitude como a parte alta do PNI é comum a formação de solos com horizontes hísticos em perfis de solo identificados nas ordens dos Neossolos, Organossolos e Cambissolos, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018). Esse acúmulo de material orgânico está diretamente relacionado as temperaturas mais baixas e ao padrão de distribuição pluviométrica local. Os horizontes hísticos dos solos da parte alta do PNI apresentam em sua maioria padrão de deposição em superfície, coloração escura e resíduos vegetais em diferentes estágios de deposição.

Em função do difícil acesso a essas áreas, por vezes alguns atributos do solo que requerem amostras indeformadas para a sua avaliação não são facilmente mensurados. Logo, nestas situações as funções de pedotransferências (FPT), utilizadas na avaliação e modelagem dos fenômenos que ocorrem no solo, são ferramentas de grande importância. A densidade do solo (D_s) é um atributo que pode apresentar grande variabilidade espacial e, nos solos com horizontes de constituição orgânica as limitações para a sua determinação incluem os métodos de coleta e a conversão dos valores de massa do solo em volume na mensuração dos estoques de C e N (Beutler et al., 2017).

Portanto, as FPTs são ferramentas que podem ser usadas na predição da D_s e consequentemente na quantificação de estoques de nutrientes como C e N nesses solos. Assim, esse capítulo teve como objetivos, nos solos da parte alta do PNI: i) aplicar as funções de pedotransferência (FPTs) construídas por Beutler et al. (2017) para estimar a densidade do solo (D_s) dos horizontes superficiais; e ii) avaliar os estoques de carbono (C) e o nitrogênio (N) nesses solos.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Parque Nacional de Itatiaia (PNI) localizado na Serra da Mantiqueira na região Sudeste do Brasil entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro ($22^{\circ} 22' 31"S$ $44^{\circ} 39' 44"O$). A sua área total é de aproximadamente $225,54 \text{ km}^2$ e cobre diferentes ecossistemas distribuídos em dois ambientes do PNI, denominados de parte alta e parte baixa (IBAMA, 1997). O PNI é influenciado pela zona tropical úmida e registra médias gerais de temperaturas de 15 a 18°C , com um regime pluviométrico de até 2.300 mm por ano (Barreto et al., 2013).

Os dois ambientes observados no PNI permitem distribuição diferenciada de temperaturas e chuvas, dessa forma na parte superior predomina o clima Cwb (verão moderadamente quente e chuvoso) com menores temperaturas, enquanto a inferior é caracterizada por verão ameno sem estação de seca ao longo do ano (Cfb).

3.4.1 Amostragem e caracterização dos solos

As amostras foram coletadas na parte alta do PNI em perfis de solo que possuíam horizontes hísticos (O ou H) (Santos et al., 2018), descritos quanto a morfologia segundo Santos et al. (2015). Os perfis foram coletados para a pesquisa publicada por Costa (2019) e no trabalho citado são encontradas mais informações sobre localização dos perfis e seus atributos.

3.4.2 Determinação da densidade do solo (Ds)

Devido à natureza orgânica de alguns horizontes, com altos teores de fibras ou material vegetal muito variável, não foi feita a coleta de amostras indeformadas de todos os horizontes e camadas dos perfis. Para os horizontes em que foi possível, a Ds foi obtida através do anel de Kopecky, sendo calculado o volume total de poros (VTP). As amostras indeformadas foram secas em estufa (105°C , por 48 horas) para obtenção da massa seca de solo (MS). Posteriormente, foram realizados os cálculos para a determinação da Ds a partir da Equação 1. pela seguinte expressão: $Ds = Ms/VT$.

Em que:

Ds = Densidade do solo (Mg m^{-3});

Ms = Massa seca do solo (Mg); e

VT = Volume total (m^{-3}).

Para a predição da Ds dos horizontes orgânicos foram utilizadas funções de pedotransferência (FPTs) desenvolvidas por Beutler et al. (2017). As FPT foram adaptadas pelos autores para solos brasileiros com horizontes de constituição orgânica (C org maior ou igual a 80 g kg^{-1}). Duas funções foram obtidas por Beutler et al. (2017), uma para horizontes que apresentavam variáveis preditoras de conteúdos de argila e carbono (FPT1) e outra para os horizontes em que foi obtido apenas o conteúdo de C (FPT2). Ambas equações desenvolvidas mostraram boa acurácia na previsão de Ds de solos com essas características. Os autores utilizaram dados de solos e horizontes orgânicos obtidos a partir de estudos realizados em diferentes regiões do Brasil, segundo o banco de dados compilado por Valladares (2003).

A equação de FPT1 apresentou valor de erro quadrático médio (RMSE) de 0,22 e a FPT2 de 0,26. Os autores compararam esses valores com os RMSE das equações publicadas por outros autores, como Hollis et al. (2012), Honeysett & Ratkowsky (1989), Adams (1973), Tamminen & Starr (1994), Manrique & Jones (1991), Bernoux et al. (1998), Tomasella & Hodnett (1998) e Benites et al. (2007). As equações de Hollis et al. (2012) e Honeysett & Ratkowsky (1989) apresentaram desempenho comparável, com valores de RMSE de 0,24 e 0,26, respectivamente.

Os resultados mostraram que as PTFs desenvolvidas por Beutler et al. (2017) tiveram desempenho semelhante ou superior às equações citadas acima, especialmente quando os dados de argila estavam disponíveis para a FPT1. A comparação foi feita utilizando gráficos de dispersão dos valores observados e preditos, além de cálculos de erro médio (ME) e coeficiente de determinação (R^2).

3.4.3 Estoques de C e N

A partir da determinação das Ds foram calculados os estoques de C e N para os perfis avaliados. Adotou-se a profundidade de 30 cm como padrão para os cálculos dos estoques e a comparação entre os perfis. O estoque foi calculado por cada horizonte dentro da profundidade de 30 cm e ao final foram somados todos os valores para obter o estoque por perfil de solo.

Para o cálculo foi utilizado o método proposto por Bernoux et al. (1998) a partir dos teores de C e N de cada horizonte, dentro da seção estabelecida.

A equação 2 foi utilizada para o cálculo do estoque de C e N.

$$\text{Estoque de C ou N} = (C \text{ ou } N \times Ds \times e) \times 10 \quad (2)$$

Em que:

Estoque de C ou N = estoque de C ou N do solo ($Mg\ ha^{-1}$);

C ou N = teor de carbono ou nitrogênio no solo ($g\ kg^{-1}$);

Ds = Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

e = espessura da camada avaliada (m).

A correção de massa não foi utilizada para o cálculo de estoques de C e N do solo, pois os perfis de solo avaliados encontram-se em condições ambientais naturais, ou seja, não foram submetidos a ações antrópicas que promovessem compactação.

3.4.4 Análises estatísticas

A avaliação geral da distribuição dos atributos ao longo dos perfis de solos foi realizada por meio função *slab*, através do programa RStudio. A função *slab* fornece a mediana limitada pelos 25º e 75º percentis da distribuição das variáveis avaliadas.

Ao todo 180 horizontes foram selecionados, dentre os quais, 30 não possuíam valores de Ds originados de amostras de campo, sendo nestas faltantes estimado o valor de Ds através de FPT (Beutler et al., 2017). Foi calculado o RMSE (*root mean square error*) entre os valores

de Ds obtidos pela FPT, ou seja, com os dados substituídos pelos valores estimados, e os medidos nas amostras coletadas em campo (RMSE geral). Também foi calculado o RSME entre os valores de Ds obtidos de amostras coletadas e os valores substituídos e os de amostras coletadas e valores não substituídos (RMSE substituída).

Para representar a variação de dados dos estoques de C e N entre as classes de solos foi utilizada a ferramenta *box plot* sendo adotado o método proposto por Tukey (1970). Essa técnica estatística permite a transformação de um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis que apresenta mesma dimensão por meio de combinações lineares. A variância dos componentes principais foi obtida através do autovalor ou raiz característica dos dados.

A análise de componentes principais (PCA) foi usada para a avaliação de eventual correlação entre as variáveis estudadas e comportamento das mesmas. A PCA permite reduzir as dimensões dos dados que apresentam a maior variância chamados de componentes principais. A variância de um componente principal é obtida através do seu autovalor ou sua raiz característica. Assim, para as variáveis conteúdo de carbono e nitrogênio (C e N), estoques de C e N (stockC_horiz e stockN_horiz), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CEC), capacidade de troca catiônica efetiva (t), saturação por bases (V), $H+Al^{+3}$ (H_AL), densidade do solo (Bd), fósforo (P) e relação C:N (CN) foram calculadas a matriz de correlação para obtenção da variância total dos dados e o percentual de variância que cada componente representava. Posteriormente, através das funções *FactorMineR* e *factoextra* foi realizada a análise de componentes principais das 13 variáveis citadas.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Caracterização dos perfis de solos

Os horizontes superficiais dos solos apresentam coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada em que predominam características decorrentes do elevado teor de matéria orgânica em graus variáveis de decomposição e humificação. Foram identificadas três classes de solos à nível de ordem: Neossolos, Cambissolos e Organossolos (Tabela 1). Ao todo foram selecionados 47 perfis, sendo 26 deles pertencentes à ordem dos Organossolos, 15 dos Cambissolos e 6 dos Neossolos, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos et al., 2018).

Tabela 1 Número (n), frequência (%) e área ocupada por perfis com horizontes hísticos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.

Classe	Símbolo ^(A)	n	Frequência %	área ^(B) ha
ORGANOSOLOS	OOs típico	9	19	
	OOs lítico	2	4	
	OOs cambissólico	2	4	
	OOs fragmentário	1	2	
	OOy lítico	6	13	4148,4
	OOy fragmentário	1	2	
	OXY típico	3	6	
	OXs típico	1	2	
	OXfi típico	1	2	
Total		26	55	
CAMBISSOLOS	CHd típico	3	6	
	CHd saprolítico	1	2	
	CHd latossólico	1	2	10254,4
	CId típico	8	17	
	CXbd típico	2	4	
Total		15	32	
NEOSSOLOS	RLi típico	3	6	
	Rld típico	1	2	
	RRd léptico	1	2	1347,7
	RRd típico	1	2	
Total		6	13	
ROCHAS				653,1
Total Geral		47	100	16403,7

Cld – Cambissolo Hístico Distrófico; CHd – Cambissolo Húmico Distrófico; CXbd – Cambissolo Háplico Tb Distrófico; RLi – Neossolo Litólico Hístico; Rld – Neossolo Litólico Distrófico; RRd – Neossolo Regolítico Distrófico; OOs – Organossolo Fólico Sáprico; OOy – Organossolo Fólico Hêmico; OXY – Organossolo Háplico Hêmico; OXs – Organossolo Háplico Sáprico; OXfi – Organossolo Háplico Fibríco.

*Tabela elaborada pela autora com dados obtidos a partir de Costa (2019).

Ao todo foram observadas 7 classes de solos à nível de Subordem sendo 3 delas pertencentes aos Cambissolos (Cambissolos Húmicos, CH; Cambissolos Hísticos, Cl; e

Cambissolos Háplicos, CX), 2 classes para Neossolos (Neossolos Litólicos, RL; e Neossolos Regolíticos, RR) e 2 classes para Organossolos (Organossolos Fólicos, OO; e Organossolos Háplicos, OX). Segundo a classificação, 11 classes à nível de Grandes Grupos, sendo eles: Cambissolo Hístico Distrófico, CId; Cambissolo Húmico Distrófico, CHd; Cambissolo Háplico Tb Distrófico, CXbd; Neossolo Litólico Hístico, RLi; Neossolo Litólico Distrófico, RLD; Neossolo Regolítico Distrófico, RRd; Organossolo Fólico Sáprico OO; Organossolo Fólico Hêmico, OOy; Organossolo Háplico Hêmico, OXy; Organossolo Háplico Sáprico, Oxs; Organossolo Háplico Fíbrico, OXfi. Ao nível de subgrupo, 18 classes: Cambissolo Hístico Distrófico típico; Cambissolo Húmico Distrófico típico; Cambissolo Húmico Distrófico saprolítico; Cambissolo Húmico Distrófico latossólico; Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico; Neossolo Litólico Hístico típico; Neossolo Litólico Distrófico típico; Neossolo Regolítico Distrófico léptico; Neossolo Regolítico Distrófico típico; Organossolo Fólico Sáprico típico; Organossolo Fólico Sáprico lítico; Organossolo Fólico Sáprico cambissólico; Organossolo Fólico Sáprico fragmentário; Organossolo Fólico Hêmico lítico; Organossolo Fólico Hêmico fragmentário; Organossolo Háplico Hêmico típico; Organossolo Háplico Sáprico típico; eOrganossolo Háplico Fíbrico típico.

Os conteúdos de carbono (C) variaram entre 50 a 150 g kg⁻¹ (Figura 1), valores relativamente altos comparados a solos minerais. Porém, os conteúdos de nitrogênio (N) foram baixos, com valores ligeiramente superiores a 10,0 g kg⁻¹. Através da análise conjunta destes atributos foi calculada a relação carbono e nitrogênio (C/N), obtendo-se valores médios entre 15 e 20 para os primeiros 30 cm de profundidade do solo.

Para a densidade do solo (Ds) observa-se incremento em profundidade, sendo os valores próximos a 0,5 Mg m⁻³ nos horizontes superficiais e maiores que 0,75 Mg m⁻³ a partir dos 30 cm de profundidade.

De maneira geral, os solos são ácidos com valores de pH entre 4,0 e 5,0 e têm acidez potencial (H+Al) alta (variando entre 10 a 25 cmol_c dm⁻³) nos primeiros 30 cm de profundidade. Observa-se pequena participação de bases (SB) no complexo sortivo, sendo a capacidade de troca catiônica (CTC) elevada, devido aos teores de MOS que resultam nos valores altos de H+Al, e a saturação por bases (V) é baixa.

A distribuição em profundidade no perfil das variáveis avaliadas é apresentada na Figura 1. Os padrões são consistentes com a natureza dominante orgânica dos solos, ou seja, baixos conteúdos de bases e elevada participação dos íons H⁺ e Al³⁺ no complexo sortivo. Os altos teores de carbono orgânico proporcionam elevados valores de capacidade de troca catiônica (CTC) e contribuem para o bom desempenho desses solos quanto as funções ecossistêmicas. Apesar dos altos valores de CTC, a capacidade de reter cátions básicos monovalentes desses solos é considerada baixa, o que pode resultar em baixos teores de potássio e sódio (Galvão & Vahl, 1996). Solos com alta CTC tendem a reter mais eficientemente cátions divalentes, como cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), em comparação com cátions monovalentes. Isso ocorre porque os cátions divalentes têm carga maior e são mais fortemente atraídos pelas superfícies dos coloides do solo. Cátions monovalentes são mais suscetíveis à lixiviação, especialmente em condições de alta precipitação. Os baixos valores de pH podem estar relacionados ainda com o teor de ácidos orgânicos (Valladares et al., 2008a).

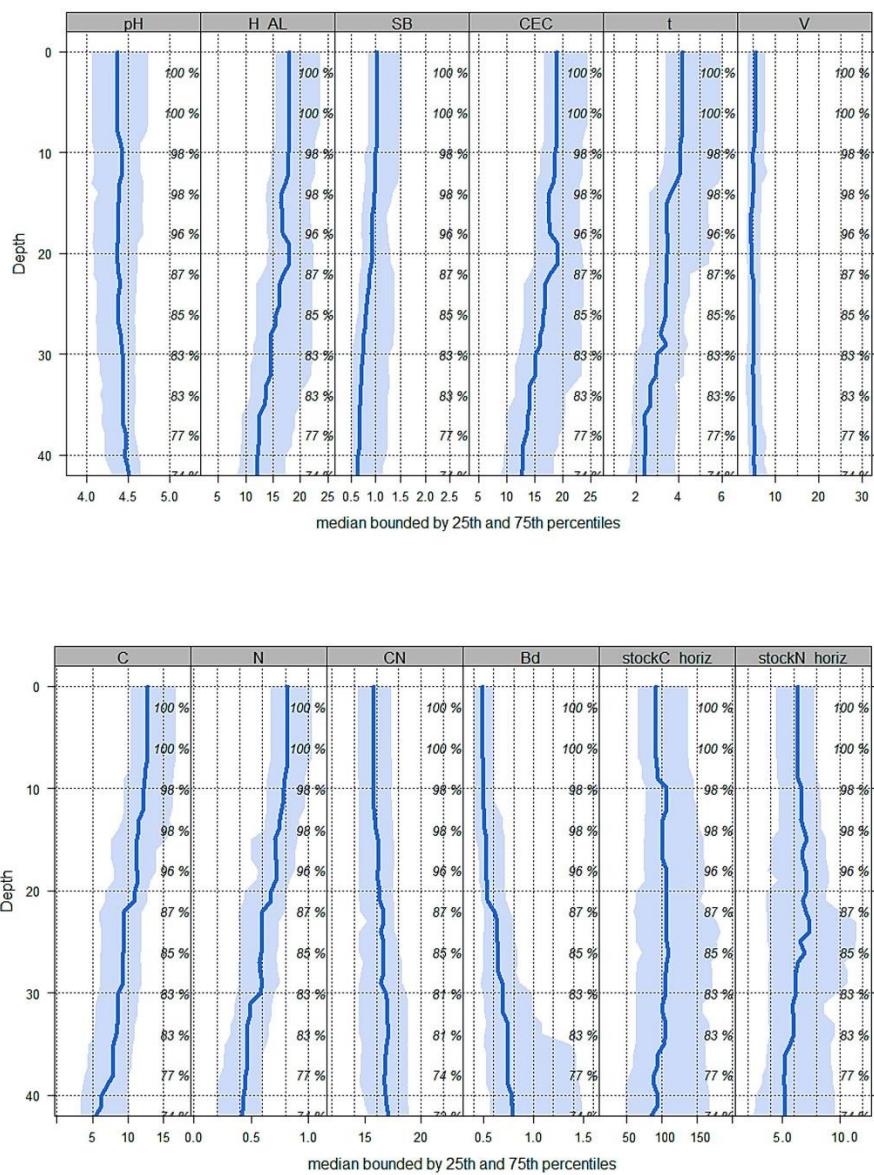


Figura 1. Distribuição em profundidade das variáveis pH, H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), soma de bases (SB) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), capacidade de troca catiônica (CTC) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), capacidade de troca catiônica efetiva (t) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), saturação por bases (V%), carbono (C) (g C kg^{-1} de solo), nitrogênio (N) (g C kg^{-1} de solo), relação C:N (C/N), densidade do solo (Ds) (Mg m^{-3}) e estoques de carbono (estoqueC) (Mg ha^{-1}) e nitrogênio (estoqueN) (Mg ha^{-1}) dos horizontes dos perfis de Neossolos, Cambissolos e Organossolos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.

Os horizontes orgânicos podem apresentar elevados teores de N, mas normalmente esse elemento não está biodisponível. A temperatura, quantidade água do solo, aeração, acidez e a relação C/N são fatores que afetam a disponibilidade de N (Andriesse, 1988), sendo os teores de N normalmente associados aos conteúdos de C do solo. Além disso, a relação C/N traz informações sobre o estado de humificação e a dinâmica da matéria orgânica do solo, em que, de forma geral, para os solos avaliados os valores de C/N são elevados. Todas essas condições

que são observadas nos solos da parte alta do PNI são reguladoras do tipo de vegetação, com o estabelecimento de espécies endêmicas (Neto et al., 2018; Benavides & Vitt, 2014), com produção de biomassa de baixos teores de nutrientes ou até mesmo estes podem ser facilmente perdidos por lixiviação, após a decomposição do material aportado.

O estudo realizado por Carvalho et al. (2014) teve como objetivo investigar os atributos físicos e químicos dos solos e a diversidade de espécies vegetais e suas relações com os diferentes habitats que constituem o mosaico de campos rupestres da Serra do Cipó em Minas Gerais no Brasil. Foram avaliadas as variáveis pH, Ca, Mg, Al, P, SOM, N, Fe, Mn, e Zn e correlacionadas com os habitats de turfeiras, pântanos arenosos, vegetação de campo em solo de textura arenosa, Cerrado e afloramentos rochosos. As propriedades físicas e químicas dos solos influenciou na diversidade de espécies vegetais que ocorrem nos habitats estudados. Como mostrado pelos autores a variação da composição florística afetou diretamente o aporte de material orgânico ao solo e, consequentemente, as entradas e estoques de nutrientes nesses ambientes.

Nos solos com horizontes de constituição orgânica a perda de massa e volume, diante de situações que alterem a sua condição natural, como a drenagem para fins agrícolas ou outros, contribui para a sua degradação. Mudanças das condições ambientais como, por exemplo, a redução do regime pluviométrico e maior perda de água por evapotranspiração das plantas também pode resultar na perda de massa e volume nesses horizontes (Hock et al., 2019). O aumento das temperaturas médias pode ser um agravante, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos que irão utilizar o material orgânico como fonte de energia (Valladares et al., 2008) e aumentar a sua transformação.

3.5.2 Avaliação da densidade do solo

Os valores de densidade do solo (Ds) de solos na parte alta do PNI, compilados em banco de dados construído por Costa (2019), estão ausentes para alguns horizontes ou camadas. Assim, foram aplicadas as funções de pedotransferências (FPT) geradas por Beutler et al. (2017) e os valores de Ds estimados foram utilizados no cálculo dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N). Como já mencionado, duas funções foram obtidas por Beutler et al. (2017), uma para horizontes que apresentassem variáveis preditoras de conteúdos de argila e carbono (FPT1) e outra para os horizontes que só apresentassem o conteúdo de C (FPT2), já que os horizontes orgânicos são de difícil quantificação da granulometria. Portanto, nas amostras com resultados de C e argila foi utilizada a FPT1 e naquelas sem o teor de argila a FPT2.

Os horizontes em que foram utilizados valores de Ds estimados a partir das FPT estão destacados em negrito na Tabela 2.

Tabela 2 Aplicação das funções de pedotransferência (FPT) segundo Beutler et al. (2017) para a obtenção da densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) de cada horizonte em perfis com horizontes hísticos no Parque Nacional de Itatiaia. Continua.

SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub
Chdlatos1	O	8,51			1,51	0,67
Chdlatos1	O	7,59	54,1	1,68		0,74
Chdlatos1	A1	5,25	55,4	1,71		0,83
Chdlatos1	A2	3,24	61	1,75		0,84
Chdlatos1	A3	2,2	63,8	1,77		0,98
CHdsapro	O1	11,22			1,44	0,47
CHdsapro	O2	5,3			1,62	0,54
CHdsapro	O	6,26			1,58	0,70
CHdsapro	O	2,61			1,79	0,87
CHdsapro	A1	0,66			2,11	0,87
CHdtipico1	A2	10,64			1,46	0,67
CHdtipico1	A3	4,22	48,4	1,73		0,72
CHdtipico1	Bi	2,83	57,1	1,75		0,82
CHdtipico1	BC	1,36	59,7	1,79		1,10
CHdtipico1	O1	0,88	48,7	1,81		1,24
CHdtipico2	O2	10,16			1,47	0,41
CHdtipico2	O3	6,04	52,8	1,70	1,59	0,73
CHdtipico2	A	4,65	48,4	1,72	1,65	0,74
CHdtipico2	AB	2,79	51,1	1,75	1,78	0,77
CHdtipico2	BA	2,62	50,3	1,76	1,79	0,94
CHdtipico3	Bi	8,45			1,51	0,59
CHdtipico3	BC	4,79	34,2	1,72	1,65	0,77
CHdtipico3	O	4,11	15,1	1,73	1,68	0,90
CHdtipico3	Bi	1,86	33,1	1,78	1,87	1,02
CHdtipico3	O1	0,89	24,4	1,81	2,04	1,06
Cldtipico1	O2	8,6			1,51	0,50
Cldtipico1	O3	7,55	61,6	1,68	1,54	0,58
Cldtipico1	O1	6,37	65,6	1,69	1,58	0,79
Cldtipico1	O2	4,83	70,3	1,72	1,65	0,72

SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub
Cldtipico1	O	2,2	75,5	1,77	1,83	0,72
Cldtipico1	OB	1,34	74,3	1,79	1,95	0,78
Cldtipico2	Bi1	12,23			1,42	0,48
Cldtipico2	Bi2	4,49	58,4	1,72	1,66	0,90
Cldtipico3	BC	9,24			1,49	0,52
Cldtipico3	O1	6,7			1,57	0,65
Cldtipico3	O2	0,91	49,7	1,80	2,03	1,19
Cldtipico3	O1	1,62	46	1,78	1,90	1,05
Cldtipico3	O2	0,39	28,8	1,83	2,22	1,16
Cldtipico4	O	14,66			1,38	1,38*
Cldtipico4	O	8,12			1,52	1,52*
Cldtipico4	A	6,58	31,2	1,69	1,57	1,69*
Cldtipico4	B1	3,07	30	1,75	1,75	1,75*
Cldtipico4	B2	1,61	34,6	1,78	1,90	1,78*
Cldtipico5	B3	9,61			1,48	0,51
Cldtipico5	O1	2,84	65,6	1,75	1,77	0,74
Cldtipico5	O2	1,64	70,7	1,78	1,90	0,78
Cldtipico5	O3	1,23	60,3	1,79	1,97	0,80
Cldtipico5	BC	0,83	49,5	1,81	2,06	0,82
Cldtipico6	O1	13,43			1,40	0,47
Cldtipico6	O2	11,17			1,44	0,46
Cldtipico6	O3	5,91	33,4	1,70	1,60	0,64
Cldtipico6	A	5,45	30,7	1,71	1,62	1,08
Cldtipico6	C	3,38	30,7	1,74	1,73	1,74*
Cldtipico6	H1	1,44	21,3		1,93	1,93*
Cldtipico7	H2	9,43			1,49	0,59
Cldtipico7	H3	20,81			1,29	0,69
Cldtipico7	HC	3,03	31,4	1,75	1,76	1,75*
Cldtipico7	O	1,37	27,8	1,79	1,94	1,79*

Tabela 2 Continua.

SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub	SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub
Cldtipico7	Bi1	0,76	29	1,81	2,08	1,81*	Ooscamb2	A	7,1			1,55	0,81
Cldtipico8	Bi2	17,16			1,34	0,41	Ooscamb2	CA	4,56			1,66	0,95
Cldtipico8	Cr	11,22			1,44	0,53	Ooscamb2	Cr	2,77			1,78	1,17
Cldtipico8	O	3,51	37,5	1,74	1,72	0,74	Oosfragmen	O1	20,04			1,30	0,37
Cldtipico8	O	2,06	34,3	1,77	1,85	0,98	Oosfragmen	O2	12,78			1,41	0,49
Cldtipico8	A1	1,14	25,3	1,80	1,98	1,00	Oosfragmen	AB	4,36			1,67	1,67*
CXbdtipico1	A2	12,73			1,41	1,41*	Ooslitico1	BA	18,2			1,33	0,22
CXbdtipico1	Bi	5,96	41,9	1,70	1,60	1,70*	Ooslitico2	Bi	15,07			1,37	0,61
CXbdtipico1	Bcr	3,7	44	1,74	1,71	1,74*	Ooslitico2	C	4,59	22	1,72	1,66	0,58
CXbdtipico1	O1	1,66	39,7	1,78	1,90	1,78*	Ooslitico2	O1	7,4	20,4	1,68	1,54	0,61
CXbdtipico2	O2	11,86			1,43	0,55	Ooslitico2	O2	11,86			1,43	1,43*
CXbdtipico2	A	8,57			1,51	0,65	Oostipico1	Cr	11,59			1,44	0,46
CXbdtipico2	AB	4,88			1,64	0,70	Oostipico1	O	9,29			1,49	0,64
CXbdtipico2	Bi	2,39	48	1,76	1,81	1,12	Oostipico2	BA	16,34			1,35	0,51
CXbdtipico2	H1	1,22	44,6	1,79	1,97	1,09	Oostipico2	Bi1	15,78			1,36	0,54
CXbdtipico2	2A	0,88	15,4	1,81	2,04	1,12	Oostipico2	Bi2	7,88			1,53	1,53*
Ooscamb1	3H2	14,02			1,39	0,56	Oostipico2	BC	1,09	24,2	1,80	1,99	1,80*
Ooscamb1	3H3	11,76			1,43	0,58	Oostipico3	O1	16,05			1,36	0,39
Ooscamb1	4H4	8,02			1,52	0,61	Oostipico3	O2	11,94			1,43	0,37
Ooscamb1	5H5	5,36	32,1	1,71	1,62	0,71	Oostipico3	A1	8,55			1,51	0,48
Ooscamb1	O1	3,65	33,2	1,74	1,71	0,94	Oostipico3	A2	6,88	25,5	1,69	1,56	0,49
Ooscamb1	OC1	2,68	63,1	1,76	1,79	0,88	Oostipico3	B1	1,11	19,8	1,80	1,99	0,76
Ooscamb1	OC2	1,01	32,3	1,80	2,01	1,14	Oostipico4	C	10,86			1,45	1,45*
Ooscamb1	O3	0,98	27,6	1,80	2,02	1,11	Oostipico4	O1	8,42			1,51	1,51*
Ooscamb2	O1	16,99			1,34	0,54	Oostipico4	O2	5,2	27,6	1,71	1,63	1,71*
Ooscamb2	O2	10,56			1,46	0,54	Oostipico4	A	1,86	33,8	1,78	1,87	1,78*

Tabela 2 Continua.

SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub	SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub
OOstipico5	BC	12,37			1,42	0,51	OOylitico3	O1	14,05			1,39	0,53
OOstipico5	O	9,46			1,48	0,56	OOylitico4	O2	24,26			1,26	0,32
OOstipico5	A1	7,95			1,53	0,50	OOylitico4	OB	15,29			1,37	0,39
OOstipico6	A2	17,15			1,34	0,46	OOylitico5	BO	7,53			1,54	0,69
OOstipico6	BA	11,23			1,44	0,53	OOylitico6	Bi	12,19			1,42	0,33*
OOstipico6	Bi	8,79			1,50	0,60	OOylitico6	O	8,63			1,51	1,51*
OOstipico6	O	9,57			1,48	0,56	OXfitipico	A1	15,82			1,36	0,29
OOstipico6	A	7,84			1,53	0,56	OXstipico	A2	12,9			1,41	0,44
OOstipico7	AB	17,46			1,34	0,46	OXstipico	AB	3,89	15,9	1,74	1,70	0,86
OOstipico7	B1	12,49			1,42	0,45	OXstipico	Bi	14,64			1,38	0,43
OOstipico7	B2	5,17			1,63	0,65	OXstipico	O1	15,54			1,36	0,41
OOstipico8	O1	12,89			1,41	0,36	OXstipico	O2	8,58			1,51	0,28
OOstipico8	O2	9,54			1,48	0,38	OXstipico	O3	29,48			1,21	0,19
OOstipico8	OB	11,62			1,43	0,41	OXytipico1	O4	21,9			1,28	0,12
OOstipico8	Bi1	5,44			1,62	0,82	OXytipico1	O5	24,24			1,26	0,15
OOstipico9	Bi2	17,24			1,34	0,23	OXytipico1	O	16,66			1,35	0,31
OOstipico9	O	11,47			1,44	0,40	OXytipico2	A1	13,04			1,41	0,78
OOstipico9	O1	13,34			1,40	0,37	OXytipico2	A2	16,31			1,35	1,35*
OOstipico9	O2	13,03			1,41	0,38	OXytipico2	Cr	14,62			1,38	1,38*
OOyfragmen	H1	10,62			1,46	0,72	OXytipico2	H	11,52			1,44	1,44*
OOyfragmen	H2	9,28			1,49	0,76	OXytipico2	O1	10,47			1,46	1,46*
OOylitico1	H3	20,81			1,29	0,41	OXytipico3	O2	16,72			1,35	0,60
OOylitico2	H4	17,6			1,33	0,34	OXytipico3	O3	14,48			1,38	0,70
OOylitico2	O1	12,67			1,41	0,45	OXytipico3	O1	10,01			1,47	0,70
OOylitico3	O2	22,17			1,28	0,27	OXytipico3	AB	6,49			1,58	0,74
OOylitico3	O3	17,07			1,34	0,41	OXytipico3	IIO2	7,39			1,54	0,82
							RLdtipico	O1	8,63	17,4	1,66	1,51	0,67

Tabela 2 Final.

SiBCS	Horizonte	C	Argila	DS_FPT1	DS_FPT2	DS_origsub
RLdtipico	O2	5,57	31	1,71	1,61	0,84
RLdtipico	O3	4,02	22,1	1,73	1,69	0,72
RLdtipico	Or4	5,61			1,61	0,96
RLitipico1	O1	12,48			1,42	0,43
RLitipico2	O2	8,4			1,51	0,49
RLitipico3	O3	11,48			1,44	0,34
RLitipico3	Or4	5,24			1,63	0,50
RLitipico3	H1	10,74			1,45	0,40
RRdleptico	H2	9,33			1,49	0,54
RRdleptico	H3	5,5	32,8	1,71	1,61	0,71
RRdleptico	Cg1	5,32	27,5	1,71	1,62	0,63
RRdleptico	Cg2	3,23	26	1,75	1,74	0,73
RRdtipico1	O1	8,15			1,52	0,67
RRdtipico1	O2	9,42			1,49	0,81
RRdtipico1	O3	5,84	34,8	1,70	1,60	0,82
RRdtipico1	Bi1	3,05	21,3	1,75	1,75	1,75*
RRdtipico1	Bi2	1,16	24,7	1,80	1,98	1,80*
RMSE geral						85
RSME substituído						43

DS_origsub* – Densidade do solo final estimada a partir das funções de pedotransferência; C – carbono total (g kg^{-1}); Argila (g kg^{-1}); Cld – Cambissolo Hístico Distrófico; CHd – Cambissolo Húmico Distrófico; CXbd – Cambissolo Háplico Tb Distrófico; RLi – Neossolo Litólico Hístico; RLd – Neossolo Litólico Distrófico; RRd – Neossolo Regolítico Distrófico; OOs – Organossolo Fólico Sáprico; OOy – Organossolo Fólico Hêmico; OXy – Organossolo Háplico Hêmico; OXs – Organossolo Háplico Sáprico; OXfi – Organossolo Háplico Fíbrico.

Os Organossolos apresentam características que são influenciadas pela elevada proporção de resíduos vegetais em diferentes estágios de decomposição, em horizontes que podem se sobrepor ao longo do tempo ou então estarem dispostos entre horizontes ou camadas minerais (Santos et al., 2018). Devido à natureza desse material orgânico a Ds normalmente é reduzida. Valladares et al. (2008) utilizaram a análise de componentes principais para avaliar Organossolos quanto às suas semelhanças, com base nos atributos morfológicos, físicos e químicos. Os autores observaram, em solos alto montanos, valores de Ds de $0,14 \text{ kg dm}^{-3}$, para perfil localizado no Paraná (PR3), e de $0,54$ a $0,96 \text{ kg dm}^{-3}$ para perfil no Rio de Janeiro (RJ1). Soares et al. (2016) encontraram valores de Ds em solos com horizontes orgânicos na parte alta do PNI, variando de $0,54 \text{ Mg m}^{-3}$ em superfície até $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ em subsuperficiais. Silva et al. (2009) verificaram valores de Ds, em solos com horizontes hísticos na Serra do Espinhaço em Minas Gerais, que variaram entre $0,03$ a $0,44 \text{ Mg m}^{-3}$. Padrão similar foi observado por Silva Neto et al. (2018) para quatro perfis com horizontes orgânicos da parte alta do PNI, com valores de Ds variando de $0,23$ a $0,82 \text{ Mg m}^{-3}$.

Comparando outros valores de Ds estimados a partir de FPTs e os de trabalhos realizados em áreas montanhosas, os dados obtidos nesse estudo ($0,5 \text{ Mg m}^{-3}$ nos horizontes superficiais e valores superiores a $0,75 \text{ Mg m}^{-3}$ a partir dos 30 cm de profundidade) são similares. Isso se deve a participação do material orgânico que diminui a relação entre massa e volume tornando-os solos orgânicos muito menos densos quando comparados aos solos minerais (não orgânicos).

Algumas FPT foram desenvolvidas para estimar estoques de C no solo (Manrique & Jones, 1991; Bernoux et al., 1998; Minasny et al., 2006; Benites et al., 2007; Kobal et al., 2011; Botula et al., 2015; Bochi et al., 2015; Nussbaum et al., 2016; Gomes et al., 2016; De Souza et al., 2017; Hengl et al., 2017; Ramcharan et al., 2018), porém existe carência de trabalhos que visem estimar os estoques de N a partir de FPTs desenvolvidas para a obtenção da Ds. A maior parte das FPTs que estimam estoques de C usam como variáveis o conteúdo de C e a granulometria (argila, silte e areia). Além disso, outros atributos como a fração grossa do solo ($>2\text{mm}$), profundidade, CTC e até mesmo covariáveis ambientais podem ser úteis na estimativa de estoques de C a partir de FPT construídas para a obtenção da Ds.

A estimativa da Ds por meio das FPTs obtidas por Beutler et al. (2017) permitiu complementar os dados necessários para esse estudo. Mas vale ressaltar que, ao analisar as valoress de Ds (Tabela 2) calculados através dessas FPTs (Beutler et al., 2017) nota-se que os valores foram superestimados em comparação aos valores de resultados de análises. O RMSE geral apresentou valor de 85, relativamente alto, indicando que as FPTs podem não ser tão eficientes para estimar o valor de Ds nos solos com horizontes orgânicos da parte alta do PNI. Porém quando avaliamos o RMSE substituído, o valor de 43 diminui consideravelmente mostrando maior eficiência da predição da Ds. Isso mostra que o uso de FPTs para complementar dados ausentes é eficiente porém precisa ser interpretado de forma cuidadosa.

Além disso, as FPTs desenvolvidas pelos autores foram aplicadas para todos os horizontes, inclusive os não orgânicos. Essa pode ser uma das justificativa para a superestimação. Uma solução seria a adoção de outras FPTs específicas para horizontes minerais. A superestimação também pode ser explicada pelo fato de que as FPTs usadas (Beutler et al., 2017) não foram desenvolvidas apenas para solos em ambientes montanhosos,

como os do PNI, mas para solos orgânicos em várias paisagens. Esses ambientes de montanha apresentam condições muito particulares e, para o melhor desempenho da FPT, ela deve ser desenvolvida a partir de conjunto de dados representativo do mesmo.

3.5.3 Estoques de C e N

Ao analisar a distribuição geral de estoques de C e N entre as três ordens de solo (Figura 2 e Tabela 3), observou-se que os estoques de C eram maiores em comparação com os de N. Os valores de estoque de C (Figura 2) nos Cambissolos variaram de 92,0 Mg ha⁻¹ no Cambissolo Húmico Distrófico típico 3 (CHdtipico3) a 476,9 Mg ha⁻¹ no Cambissolo Hístico Distrófico típico 4 (Cldtipico4). Nos Neossolos, a variação no estoque de C foi de 104,9 Mg ha⁻¹ no Neossolo Litólico Hístico típico 3 (RLitipico3) a 190,2 Mg ha⁻¹ no Neossolo Regolítico Distrófico típico (RRdtipico). Enquanto nos Organossolos a variação dos estoques de C foi de 91,3 Mg ha⁻¹ no Organossolos Háplico Hêmico típico 1 (OXytipico1) a 640,9 Mg ha⁻¹ no Organossolo Háplico Hêmico típico 2 (OXytipico2).

A variação de estoques de N para as três ordens de solo esteve entre 4,8 Mg ha⁻¹ no Cambissolo Húmico Distrófico típico 3 (CHdtipico3) e 30,5 Mg ha⁻¹ no Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico 1 (CXbdtipico1) entre os Cambissolos. A variação de estoque N entre os Neossolos foi de 5,6 Mg ha⁻¹ no Neossolo Litólico Hístico típico 2 (RLitipico2) e 13,8 Mg ha⁻¹ no Neossolo Regolítico Distrófico típico (RRdtipico). Nos Organossolos a variação observada de estoque de N foi de 6,0 Mg ha⁻¹ no Organossolos Háplico Hêmico típico 1 (OXytipico1) e 37,1 Mg ha⁻¹ no Organossolos Háplico Hêmico típico 2 (OXytipico2).

A área ocupada por solos com horizontes hísticos, dados obtidos a partir de Costa (2019), incluindo as 3 ordens de solos, na parte alta do PNI (Tabela 3) corresponde a 16.403,7 hectares, o que equivale a um estoque de 3.269,9 Gg de C e 204,3 Gg de N. Desta área total, 10.254,44 ha correspondem aos Cambissolos, com estoque de 830,4 Gg de C e 53,1 Gg de N. Para os Organossolos, a área ocupada é de 4.148,4 ha e o estoque de 2.241,9 Gg de C e 13,78 Gg de N. A área de Neossolos é de 1347,7 ha e foi quantificado o estoque de 196,6 Gg de C e 13,4 Gg de N. Os afloramentos rochosos ocupam área de 653,13 ha.

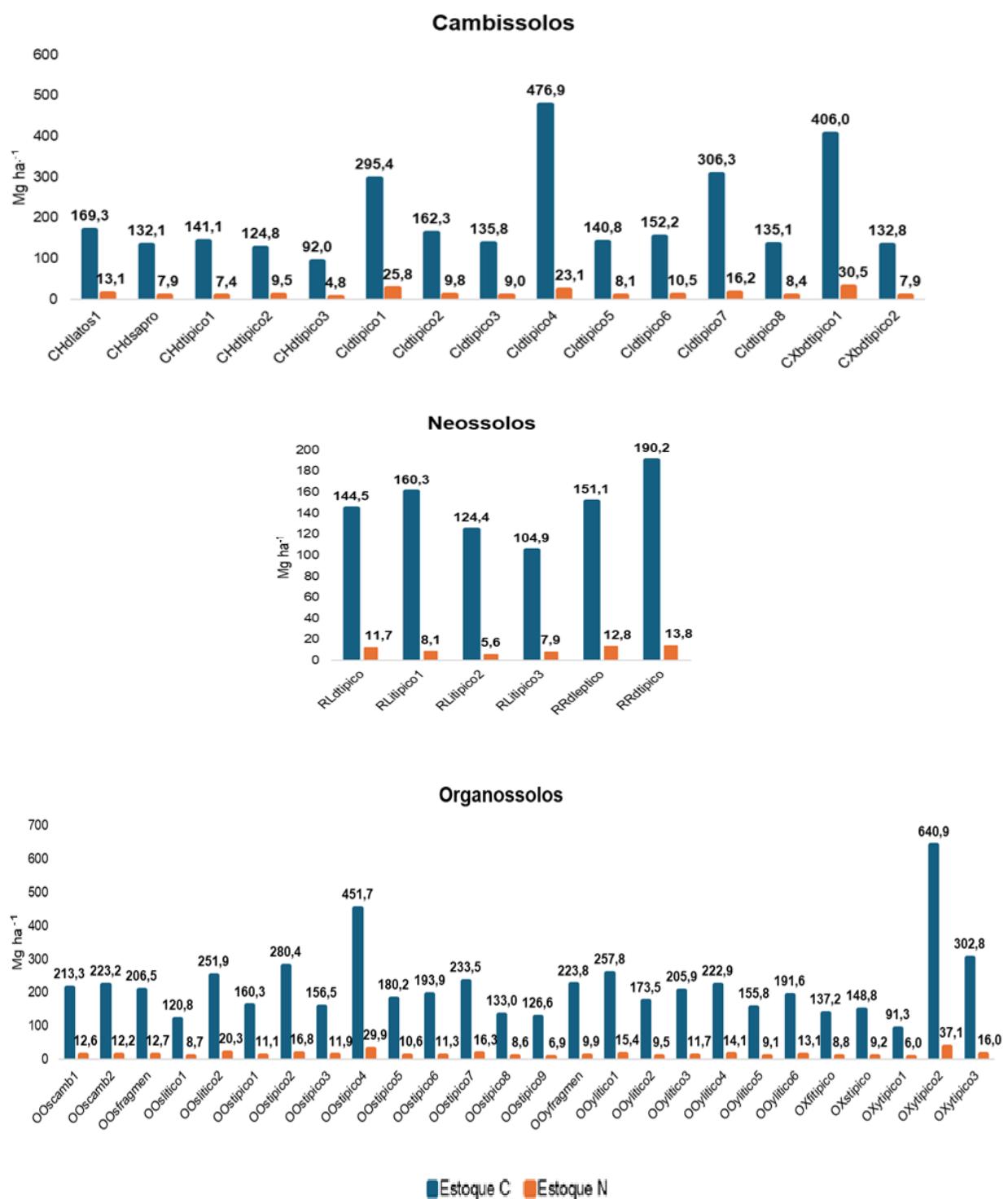


Figura 2 Variação dos estoques de carbono e nitrogênio (30 cm) em perfis com horizontes hísticos encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.

Tabela 3 Estoques de carbono e nitrogênio em perfis com horizontes hísticos (até 30 cm) encontrados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.

Classe	Símbolo ⁽¹⁾	Estoque	Estoque	Estoque	Estoque
		C 30 cm	N 30 cm	total C área ⁽²⁾ Ordem	total N área ⁽²⁾ Ordem
<i>Mg ha⁻¹</i>					
ORGANOSOLOS	OOs típico	212,9	13,7		
	OOs lítico	201,3	12,1		
	OOs cambissólico	345,0	19,7		
	OOs fragmentário	186,4	14,5		
	OOy lítico	218,2	12,4	2.241,9	137,8
	OOy fragmentário	206,5	12,7		
	OXY típico	223,8	9,9		
	OXs típico	148,8	9,2		
	OXfi típico	137,2	8,8		
média estoques/classe		218,6	13,4		
CAMBISSOLOS	CHd típico	225,6	13,8		
	CHd saprolítico	119,3	7,2		
	CHd latossólito	269,4	19,2	830,4	53,1
	Cld típico	132,1	7,9		
	CXbd típico	169,3	13,1		
média estoques/classe		200,2	12,8		
NEOSSOLOS	RLi típico	129,9	7,2		
	RLd típico	144,5	11,7		
	RRd léptico	151,1	12,8	196,6	13,4
	RRd típico	190,2	13,8		
	média estoques/classe		145,9	10,0	
Estoque total C e N área total (Mg)				3.269,9	204,3

⁽¹⁾ Cld – Cambissolo Hístico Distrófico; CHd – Cambissolo Húmico Distrófico; CXbd – Cambissolo Háplico Tb Distrófico; RLi – Neossolo Litólico Hístico; RLd – Neossolo Litólico Distrófico; RRd – Neossolo Regolítico Distrófico; OOs – Organossolo Fólico Sáprico; OOy – Organossolo Fólico Hêmico; OXY – Organossolo Háplico Hêmico; OXs – Organossolo Háplico Sáprico; OXfi – Organossolo Háplico Fíbrico. ⁽²⁾ Dados de área obtidos a partir de Costa (2019). 1 Gigagrama (Gg) equivale a 1000 Megagramas (Mg).

Os estoques médios de C observados nos perfis de Cambissolos são inferiores aos quantificados para os Organossolos (Tabela 3). Embora os Cambissolos ocupem maior área (10.254,4 ha) na parte alta do PNI, em função dos maiores estoques de C nos perfis de Organossolos (Tabela 3), o estoque total de C total em toda á área (4.148,4 ha) de Organossolos é mais que duas vezes e meia (2,7 vezes) o valor para os Cambissolos. Esse mesmo padrão pode ser observado para os estoques de N. A área ocupada por cada classe de solo é fundamental na capacidade de estoque de C e N dos solos na parte alta do PNI, mas vale ressaltar que todas as classes de solo avaliadas desempenham função relevante quanto a prestação dos serviços ecossistêmicos, independente da área ocupada.

3.5.4 Análise de componentes principais

O método de análise de componentes principais (ACP) foi aplicado (Figura 3) a todos os perfis de solos (Cambissolos, Neossolos e Organossolos) para as variáveis pH, H+Al, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CEC), capacidade de troca catiônica efetiva (t), saturação por bases (V), carbono (C), nitrogênio (N), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) e estoques de carbono (stockC_horiz) e nitrogênio (stockN_horiz) para as duas primeiras dimensões da ACP. As dimensões 1 e 2 explicam em conjunto 53,4% da variação dos dados sendo a dimensão 1 (Dim1) responsável por 38,8% da variância total e a dimensão 2 (Dim2) por 14,6% da variância total dos dados.

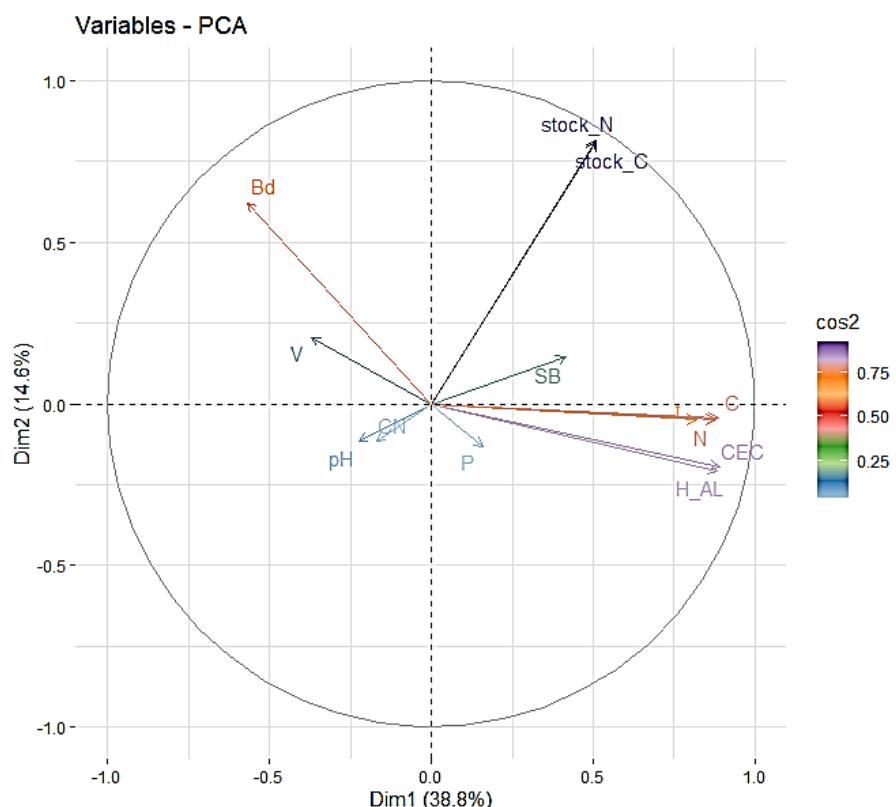


Figura 3 Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H+Al (cmolc dm^{-3}), soma de bases (SB) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm^{-3}), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg^{-1}), nitrogênio (N) (g kg^{-1}), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m^{-3}) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha^{-1}) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha^{-1}), de perfis com horizontes hísticos (Cambissolos, Neossolos e Organossolos) encontrados no Parque Nacional de Itatiaia.

As variáveis em destaque na ACP (Figura 3) foram: estoque de C, estoque de N, CEC, H+Al, C, N, t e densidade do solo (Bd), sendo possível observar três grupos com maior correlação entre si. O primeiro grupo inclui as variáveis estoque de C e estoque de N, o segundo grupo as variáveis N, CEC, H+Al, C, N e t, e o terceiro grupo apenas densidade do solo. Esses três grupos estão inversamente relacionados entre si.

A Figura 4 mostra que para as dimensões 1 e 2 as variáveis menos significativas foram: pH, P e CN, foram a SB e o V%. A dimensão 3 (13,3%) apresentou percentual de variância similar a dimensão 2 (14,6%). Ao realizar a análise das variáveis mais significativas incluindo a dimensão 3 na análise dos dados percebe-se que as variáveis SB e V% se destacam. Com essas duas varáveis são capazes de explicar 66,7% da variação total dos dados.

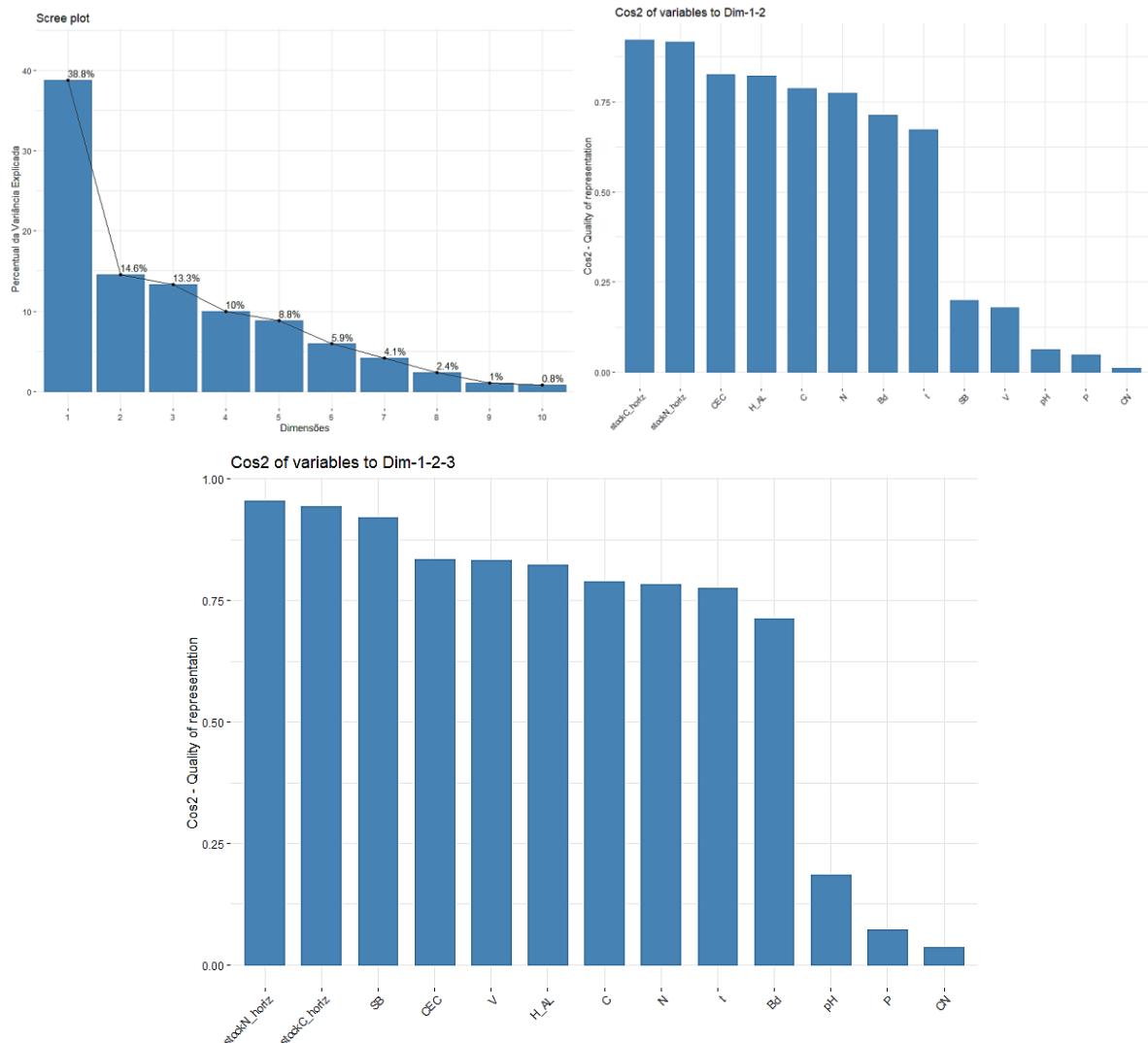


Figura 4 Percentual da variância geral explicada para cada dimensão da análise de componentes principais (ACP) das 13 variáveis avaliadas (A) e variáveis mais significativas para a CP1 e CP2 (B) e CP1, CP2 e CP3 (C).

Legenda: Conteúdo de carbono e nitrogênio (C e N), estoques de C e N (stockC_horiz e stockN_n_horiz), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CEC), capacidade de troca catiônica efetiva (t), pH, saturação por bases (V), H₊Al+3 (H_AL), densidade do solo (Bd), fósforo (P) e relação C:N (CN).

Foram obtidas ACPs individuais para as três classes de solos, Cambissolos (Figura 5), Neossolos (Figura 6) e Organossolos (Figura 7).

Para os Cambissolos (Figura 5) as duas primeiras dimensões da ACP representam 60,9% da variação dos dados sendo a Dim1 responsável por 45,8% da variação dos dados e a Dim2

por 15,1%. As principais variáveis observadas para a construção da ACP dos Cambissolos foram: SB, CEC, V, H_AL, N, C e T. As variáveis stock_C, stock_N, Ph, Bd, CN e P foram as menos significativas para a representação da ACP dos perfis de Cambissolos. Pela ACP nota-se que as variáveis que estão mais relacionadas entre si são: CEC, H_AL, N, C, stock_N e stock_C. Essas variáveis são inversamente relacionadas com as variáveis Bd, pH e CN.

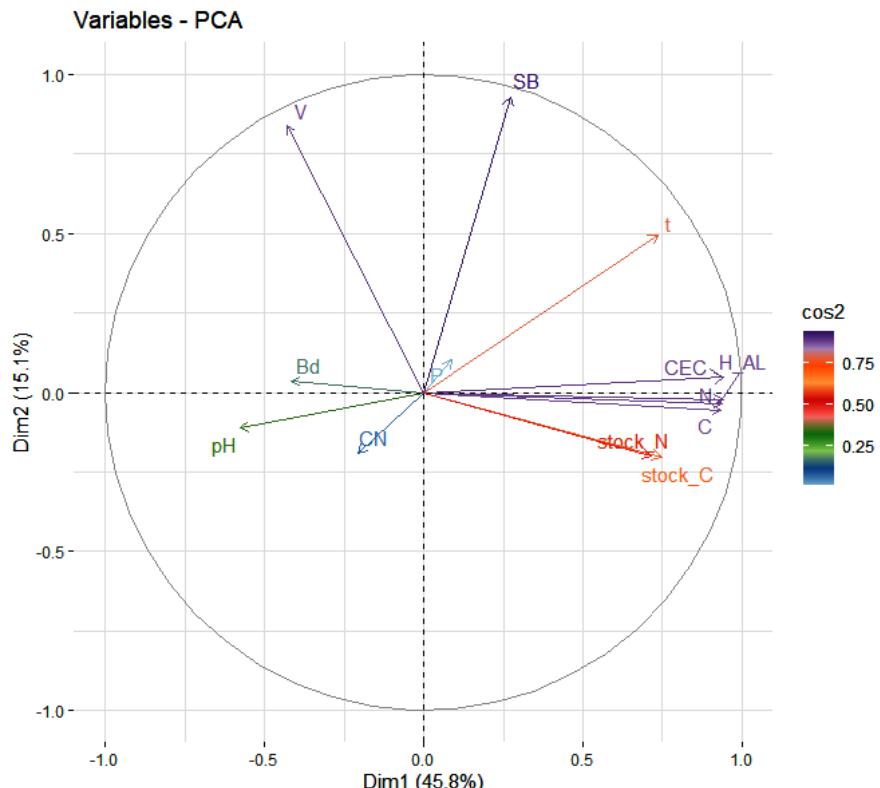


Figura 5 Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H+Al (cmolc dm^{-3}), soma de bases (SB) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm^{-3}), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg^{-1}), nitrogênio (N) (g kg^{-1}), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m^{-3}) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha^{-1}) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha^{-1}) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Cambissolos coletados no Parque Nacional de Itatiaia.

Para os perfis classificados como Neossolos (Figura 6) as duas primeiras dimensões representaram juntas 56,9% da variação dos dados sendo a Dim1 responsável por 38,5% e a Dim2 18,4%. As variáveis mais significativas para a construção da ACP dos Neossolos foram: C, SB, t, stock_C, N, CEC, H_AL, Bd, stock_N, V, pH, P e CN. As variáveis CEC, t, H_AL, N e C estão mais relacionadas entre si e estão inversamente associadas com Bd e CN. As variáveis pH, V e P também apresentam correlação entre si, estando inversamente relacionadas com as variáveis stock_C e stock_N.

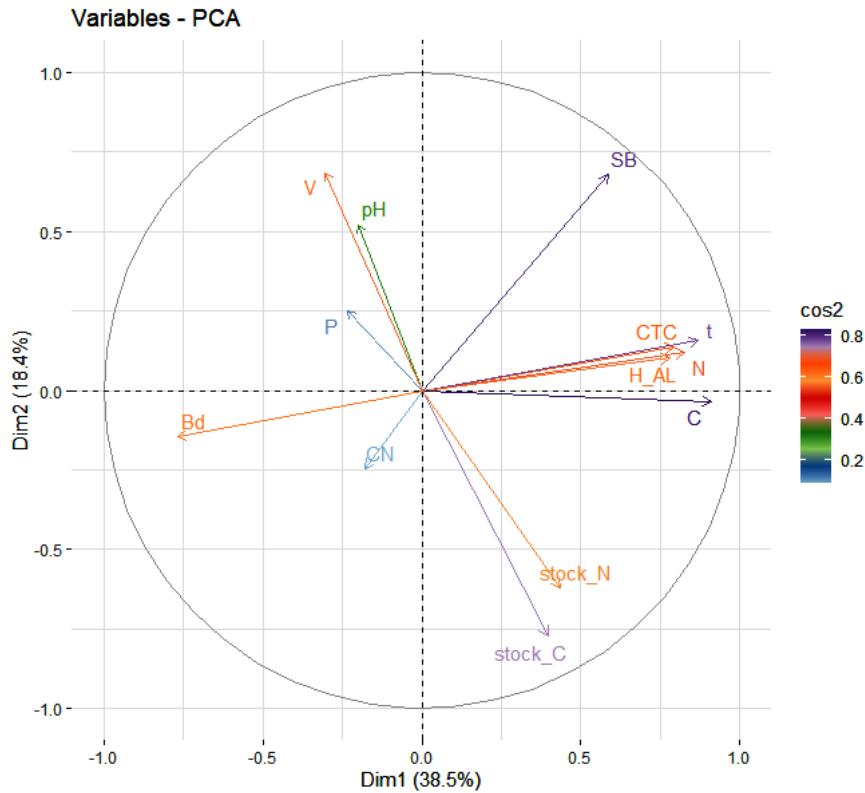


Figura 6 Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H+Al (cmolc dm^{-3}), soma de bases (SB) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm^{-3}), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg^{-1}), nitrogênio (N) (g kg^{-1}), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m^{-3}) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha^{-1}) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha^{-1}) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Neossolos coletados no Parque Nacional de Itatiaia

Para os Organossolos (Figura 7) as duas primeiras dimensões representaram juntas 52,6% da variação dos dados. A Dim1 explica 34,3% da variação dos dados e a Dim2 explica 18,3% da variação dos dados. As variáveis mais significativas para a construção da ACP dos Organossolos foram: stock_N, stock_C, Bd, H_AL, CEC, t, N, C, V, pH, SB, CN e P. As variáveis que apresentam maior correlação entre si foram: t, N, C, CEC, H_AL, que são inversamente relacionadas com as variáveis CN, pH, V e Bd.

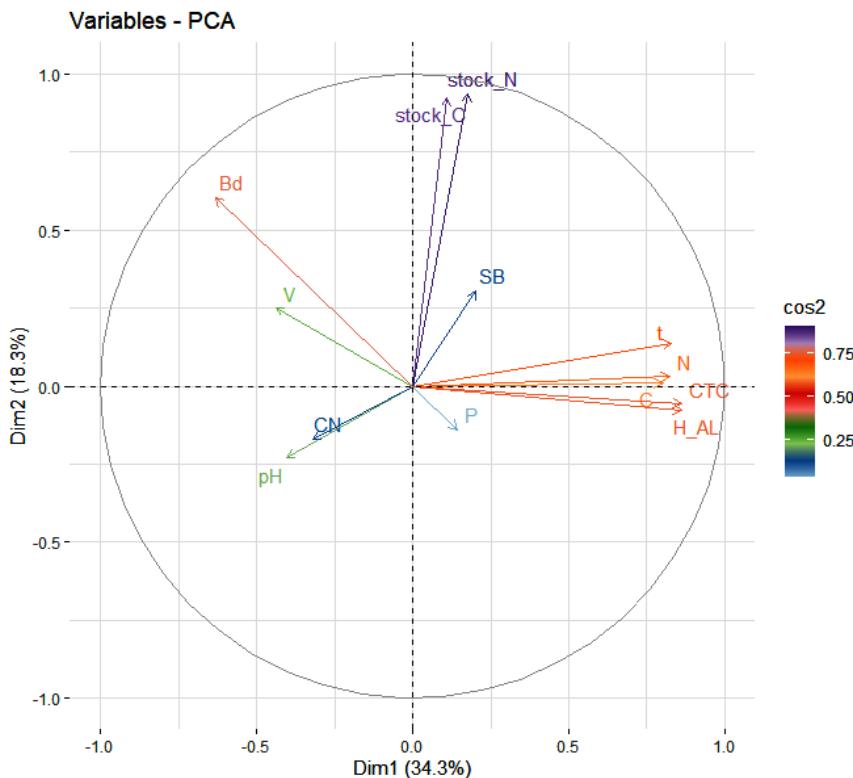


Figura 7 Análise de componentes principais (ACP) das variáveis pH, H+Al (cmolc dm^{-3}), soma de bases (SB) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica (CEC) (cmolc dm^{-3}), capacidade de troca catiônica efetiva (t) (cmolc dm^{-3}), saturação por bases (V), carbono (C) (g kg^{-1}), nitrogênio (N) (g kg^{-1}), relação C:N (CN), densidade do solo (Bd) (Mg m^{-3}) e estoques de carbono (stockC_horiz) (Mg ha^{-1}) e nitrogênio (stockN_horiz) (Mg ha^{-1}) obtidas a partir de perfis com horizontes hísticos classificados como Organossolos coletados na do Parque Nacional de Itatiaia.

A análise dos gráficos de ACPs permite identificar quais variáveis estão mais relacionadas entre si e quais melhor explicam as condições de cada classe de solo em função de seu ambiente de formação. De maneira geral, a ACP para todas as classes de solos mostra que os estoques de C e N apresentam grande relação entre si, ilustrada pela proximidade dos seus vetores, assim como os conteúdos de C e N e as variáveis químicas. Esse resultado reforça a importância do material orgânico para o estabelecimento da qualidade e importância dos solos na parte alta do PNI quanto aos serviços ecossistêmicos. Os gráficos de ACP para cada classe de solo indicam o mesmo padrão de proximidade dos vetores. No entanto, para os Cambissolos, os estoques de C e de N estão mais relacionados com as propriedades químicas desses solos.

Vale destacar que, em classes de solos de maior intensidade de pedogênese, os constituintes minerais, especialmente a argila, favorecem a formação de microagregados que permitem que o C e o N sejam estabilizados fisicamente. As classes de solos Cambissolos, Neossolos e Organossolos, identificadas na parte alta do PNI, possuem menor desenvolvimento pedogenético, com menor profundidade de horizontes subsuperficiais e perfis de solo rasos a pouco profundos; portanto, esse mecanismo de estabilização de C e N é menos expressivo.

Entre os serviços ecossistêmicos prestados pelos solos de constituição orgânica nos horizontes superficiais, avaliados na parte alta do PNI, podem ser citados: a regulação do clima

local, através do maior armazenamento de água e redução da evapotranspiração, além do controle de temperatura reduzindo o efeito de variações extremas; a regulação do clima global, através do armazenamento de C e N no solo, evitando emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera; o abastecimento, filtragem e regulação e escoamento da água e sua disponibilidade. A regulação do escoamento da água interfere diretamente nas taxas de erosão e, portanto, nas perdas de nutrientes e matéria orgânica em superfície. Além de estabelecimento de condições propícias para desenvolvimento de fauna e flora, inclusive biodiversidade endêmica nos ambientes da parte alta do PNI. Esses solos também são considerados arquivos da história natural do planeta, fornecendo informações sobre climas e vegetações pretéritas. Por fim, prestam serviços relacionados a estética da paisagem e recreação, afetando diretamente o bem-estar humano (Silvius et al., 2000; Geitner et al., 2019; Stanchi, 2021; Beer et al., 2021).

Como já mencionado, solos com alto teor de matéria orgânica são tidos como frágeis e constituem *hot spots* onde ocorrem (FAO, 2021). Quando submetidos a práticas de uso e manejo inadequadas a capacidade de prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos desses solos é rapidamente afetada. Portanto, é necessária a elaboração de estratégias especiais de manejo e conservação para o uso sustentável por parte da comunidade científica, sociedade civil e organizações internacionais (Turetta et al., 2017).

No caso do PNI, sendo uma unidade de conservação, é importante que os mecanismos de estabilização dos estoques de C e N e sua variabilidade espacial, em especial nos solos com horizontes orgânicos na parte alta do parque, sejam melhor compreendidos e as variáveis edáficas relevantes sejam monitoradas. Desta forma será possível mitigar efeitos decorrentes das mudanças ambientais de forma precisa e efetiva, para que a prestação dos serviços ecossistêmicos, por esses solos, não seja afetadas.

3.6 CONCLUSÕES

As funções de pedotransferência desenvolvidas por Beutler et al. (2017) permitiram estimar a densidade do solo em amostras do horizonte superficial de elevado teor de matéria orgânica, nos quais esse atributo não foi analisado anteriormente. Desta forma, foi possível quantificar os estoques de carbono (C) e o nitrogênio (N) nos solos estudados na parte alta do PNI com a substituição de dados faltantes.

De uma forma geral, a constituição orgânica dos horizontes superficiais dos perfis de solos avaliados na parte alta do PNI se expressa em forte relação entre os atributos: conteúdos de C e N, valor de CEC, t e de H+Al. Para os perfis de Cambissolos, esses atributos apresentaram relação ainda maior com os estoques de C e N.

Para os Cambissolos verificaram-se valores médios de estoques de C e N de 830,4 Gg e 53,1Gg, respectivamente, valores esses inferiores aos observados para os Organossolos (2.241,9 Gg e 137,8, respectivamente). Embora os Cambissolos ocupem maior área (10.254,4 ha) na parte alta do PNI, em função dos maiores estoques de C nos perfis de Organossolos, o estoque total de C total em toda a área (4.148,4 ha) de Organossolos é mais que duas vezes e meia (2,7 vezes) o valor para os Cambissolos. Esse mesmo padrão pode ser observado para os estoques de N. Este resultado ressalta a importância da proteção desses solos para a unidade de conservação (PNI) e pelos serviços ecossistêmicos prestados.

4 CAPÍTULO II:

FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E CLASSIFICAÇÃO DE ORGANOSOLOS NO PARQUE NACIONAL DE ITATIAIA

Parte do Capítulo encaminhado para a Revista Brasileira de Ciência do Solo.

ZIVIANI, M. M.; SILVA, L. H. D.; SCOTT, J. P. C.; ALVES, A. S.; PINTO, L. A. D. S. R.; MOTTA, M. S.; ANJOS, L. H. C. D. Humic fractions as support for the classification of high-mountain Organosolos in the southeast of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, p. e0240005, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20240005

4.1 RESUMO

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) adota uma abordagem hierárquica para classificar os solos, utilizando atributos diagnósticos específicos. A classe dos Organossolos é diferenciada em função de sua gênese influenciada por material de origem de composição orgânica, requerendo assim atributos diagnósticos que descrevam as propriedades únicas da matéria orgânica do solo (MOS). O estudo teve como objetivo geral propor a utilização do carbono orgânico lável e dos conteúdos de C e N das frações húmicas e suas relações para definir classes em níveis inferiores no SiBCS, para Organossolos Fólicos e Háplicos no Parque Nacional de Itatiaia (PNI). Foi realizado o fracionamento químico quantitativo da MOS, obtendo-se as frações húmicas e determinado o carbono lável oxidável em 16 perfis de Organossolos do PNI, RJ. Foram obtidos os teores de carbono e nitrogênio das frações ácido húmico, ácido fúlvico e humina, bem como a porcentagem dessas frações em relação ao total de carbono e nitrogênio do solo. Também foram calculadas as relações de carbono e nitrogênio para cada fração. Os resultados mostraram pouca variação nos teores de carbono orgânico lável entre os perfis, mas uma ampla variação nos teores de carbono e nitrogênio total, especialmente no perfil de Organossolo Fólico Hêmico lítico. Os índices das relações entre o carbono e nitrogênio dos ácidos húmicos e ácidos fúlvicos (médias de CAH/CAF = 1,61 e NAH/NAF = 1,05), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e humina (médias de CEA/CHUM = 0,71 e NEA/NHUM = 0,38), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e carbono total e nitrogênio total (médias de CEA/CT = 0,28 e NEA/NT = 0,19) revelaram-se eficazes na avaliação do grau de humificação dos perfis. O estudo propõe que os atributos avaliados, em especial a relação entre o carbono do extrato alcalino das substâncias húmicas (carbono da fração ácido fúlvico + carbono da fração ácido húmico) e o carbono total do solo além da relação entre C e N da fração humina, sejam adotados para a definição de níveis categóricos inferiores de Organossolos. Essa nova abordagem poderia aperfeiçoar a classificação desses solos, contribuindo para melhor entendimento dos Organossolos em ambientes de montanha no Brasil e sua proteção.

Palavras-chave: Ácido húmico. Ácido fúlvico. Humina. Carbono lável. SiBCS. Níveis categóricos.

4.2 ABSTRACT

The Brazilian Soil Classification System (SiBCS) adopts a hierarchical approach to classify soils, utilizing specific diagnostic attributes. The class of Organossolos is differentiated based on genesis influenced by the organic composition of the parent material, thus requiring diagnostic attributes that describe the unique properties of soil organic matter (SOM). This study aimed to propose the use of labile organic carbon and the contents of C and N in humic fractions and their relationships to define classes at the SiBCS lower levels for *Organossolos Fólicos* and *Hápicos* (equivalent to Histosols) in the Itatiaia National Park (PNI). A quantitative chemical fractionation of SOM was performed, obtaining the humic fractions and determining the oxidizable labile carbon in 16 profiles of *Organossolos* from Itatiaia National Park, RJ. The carbon and nitrogen contents of the humic acid, fulvic acid, and humin fractions were obtained, as well as the percentage of these fractions in relation to the total carbon and nitrogen of the soil. The carbon and nitrogen ratios for each fraction were also calculated. The results showed little variation in labile organic carbon contents among the profiles, but a wide variation in total carbon and nitrogen contents, especially in the profile of *Organossolo Fólico Hêmico lítico*. The indices of the ratios between carbon and nitrogen of humic acids and fulvic acids (mean CAH/CAF = 1.61 and NAH/NAF = 1.05), carbon and nitrogen of the alkaline extract and humin (mean CEA/CHUM = 0.71 and NEA/NHUM = 0.38), carbon and nitrogen of the alkaline extract and total carbon and total nitrogen (mean CEA/CT = 0.28 and NEA/NT = 0.19) proved effective in assessing the degree of humification of the profiles. The study proposes that the evaluated attributes, especially the ratio between the carbon of the alkaline extract of humic substances (carbon of the fulvic acid fraction + carbon of the humic acid fraction) and the total soil carbon, in addition to the C and N ratio of the humin fraction, be adopted for the definition of lower categorical levels of *Organossolos*. This new approach could improve the classification of these soils, contributing to a better understanding of the *Organossolos* in mountain landscapes of Brazil and to their protection.

Keywords: Humic acid. Fulvic acid. Humin. Alkaline extract. Labile carbon. SiBCS. Categorical levels.

4.3 INTRODUÇÃO

No Brasil, devido as condições climáticas predominantes, quente e úmidas, são favorecidos os processos relacionados às transformações (decomposição, mineralização e humificação) da matéria orgânica do solo (MOS). Por esse motivo a formação de solos com altos teores de carbono é limitada aos locais que favorecem o acúmulo do material orgânico ao longo do tempo, como por exemplo ambientes altomontanos, hidromórficos ou em materiais de origem ricos em carbonatos (Valladares et al., 2003; Pereira et al. 2013).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) é um sistema hierárquico de classificação de solos que visa sistematizar e classificar os solos brasileiros. Para estabelecer as classes de solos são selecionados e definidos atributos diagnósticos, horizontes diagnósticos (superficiais e subsuperficiais), que devem ocorrer dentro de uma determinada seção de controle (profundidade ou espessura do solo). O SiBCS é um sistema de classificação morfopedogenético, e desta forma através da análise da morfologia do perfil no campo podem ser inferidos os principais processos que atuaram na gênese dos solos (Santos et al., 2018).

A estrutura do SiBCS é definida em seis níveis categóricos, em que os primeiros quatro níveis (ordem, subordem, grandes grupo e subgrupo) são organizados em chave taxonômica (Santos et al., 2018). Para o 5º (famílias) e 6º (séries) níveis categóricos, são recomendados atributos diagnósticos específicos e de maior relevância para o uso e manejo dos solos, contudo, esses níveis não estão organizados em uma chave. Na chave taxonômica de ordem no SiBCS, os Organossolos são a primeira classe identificada pela sua constituição orgânica, diferindo das demais ordens, que são também referidas, de forma geral, como solos minerais.

Para ser considerado um solo de constituição orgânica as propriedades do material orgânico devem ser preponderantes aquelas do material mineral do solo segundo o SiBCS (Santos et al., 2018). Como resultado dois diferentes tipos de horizontes orgânicos podem ser formados, se diferenciando pelas condições de boa drenagem, em que o perrfil não permanece saturado por água por mais de 30 dias consecutivos no período de chuvas (horizonte O), e sob condições de excesso de água, por longo período (horizonte H). Quanto a ocorrência dos horizontes diagnósticos hísticos (material orgânico com espessura e teor de carbono orgânico elevado conforme definido no SiBCS), estes são encontrados nos Organossolos e também em outras classes, como os Cambissolos, Gleissolos e Neossolos.

Os Organossolos são definidos como:

“solos pouco evoluídos com coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada apresentando mais de 80 g kg⁻¹ de carbono orgânico na constituição dos seus horizontes hísticos diagnósticos. Quando constituídos por horizonte O hístico, este horizonte deve apresentar 20 cm ou mais quando sobrejacente a contato lítico ou lítico fragmentário ou até mesmo sob cascalhos, calhaus ou matações ou 40 cm ou mais ou mais quando sobrejacente a horizontes A, B e ou C. Quando formados por horizontes H devem apresentar 40 cm ou mais, de forma contínua ou cumulativa dentro dos primeiros 80 cm a partir da superfície” (Santos et al., 2018).

Em regiões montanhosas, o acúmulo do material orgânico é favorecido pela redução da atividade biológica reduzindo a intensidade dos processos de humificação e mineralização da MOS. Essa redução está relacionada com as baixas temperaturas e condições pluviométricas variáveis que afetam negativamente a atividade enzimática dos microrganismos (Pereira et al., 2005). Além disso, na maioria das vezes essas áreas são cobertas por vegetações naturais preservadas (como por exemplo, os campos de altitude) que adicionam continuamente material orgânico ao solo (Barreto et al., 2013).

A matéria orgânica que compõe os Organossolos é formada a partir de diferentes fontes e quando depositada pode estar em diferentes estágios de decomposição. Uma parte importante dessa matéria orgânica do solo são as frações húmicas, que representam o material que já passou por algum processo de transformação como a humificação. As frações húmicas da MOS possuem papel importante na formação, diferenciação e transformações que ocorrem nos perfis de solos. Os processos envolvidos na humificação do material orgânico e formação de horizontes hísticos podem ser variados e são afetados por fatores ambientais, que ditarão a velocidade das transformações deste material.

O fracionamento químico da MOS é uma técnica utilizada para obter as frações húmicas através de extrações sequenciais com base em diferentes solubilidades das frações orgânicas, que são identificadas como ácido fúlvido (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM) (Benites et al., 2003). Essas frações representam importante compartimento de estoque de carbono no solo e na dinâmica de nutrientes. O somatório dessas frações representa, em geral, mais de 80% do carbono total do solo, sendo também diferenciadas pela cor, massa molecular, grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, etc) e grau de polimerização (alifaticidade, aromaticidade e condensação) (Stevenson, 1982).

A persistência ou mobilidade das frações húmicas no perfil de solo podem ser indicativos de processos pedogenéticos e tipos de horizontes diagnósticos (Fontana et al. 2008ab). Entre os trabalhos que estudam os padrões de distribuição das frações húmicas no perfil de solo para fins de classificação, citam-se Fontana (2009), Benites (1998, 2002), Benites et al. (2000), Lima (2001), Schaefer et al. (2002), Melo (2002), e Valladares et al. (2007). Valladares et al. (2003) e Fontana et al. (2008ab) foram os primeiros pesquisadores a propor critérios para a classificação de solos orgânicos a partir da utilização das frações húmicas do solo. Fontana et al. (2008ab) estabeleceram um padrão para as frações húmicas na classificação de solos em níveis hierárquicos inferiores, propondo os teores de C-FAF (carbono da fração ácido fúlvico) e C-FAH (carbono da fração ácido húmico), além do índice húmico (C-EA/C-HUM) obtido pela divisão do somatório do carbono do extrato alcalino (C-FAF+C-FAH) pelo carbono da fração humina (C-HUM).

O SiBCS propõe para o 5º nível categórico da classe dos Organossolos atributos que distinguem a natureza do material encontrado abaixo da camada orgânica ou características e proporções do material orgânico que o constitui. As características diferenciais para o 6º nível categórico sugeridas são a espessura, o estado de decomposição do material orgânico e a presença de lençol freático, a fim de identificar o potencial de subsidência e melhor manejo desses solos (Santos et al., 2018).

Entretanto, para os Organossolos, Valladares et al. (2003) e Fontana et al. (2011),

concluem que as frações húmicas e suas relações podem ser atributos diagnósticos úteis na diferenciação dos níveis mais baixos de classificação. As sugestões de classificação para os níveis categóricos inferiores propostas por Fontana et al. (2008b) e Valladares et al. (2003) adotam os conteúdos de C das frações AF ($=20,0 \text{ g kg}^{-1}$: hipofúlvico; $>20,0 \text{ g kg}^{-1}$: fúlvico) e AH ($=90,0 \text{ g kg}^{-1}$: hipohúmico; $>90,0 \text{ g kg}^{-1}$: húmico) e o índice obtido entre a relação entre CEA/HUM ($=1,0$: hipoalcalino-solúvel; $>1,0$: alcalino-solúvel). Fontana et al. (2011) propuseram a relação entre C-FAH/ C-FAF para a categorização dos solos com horizontes hísticos O e H nos níveis hierárquicos inferiores de família e série.

A quantificação dos compartimentos lábeis e húmicos da MOS é fundamental para o entendimento da dinâmica do carbono e nitrogênio no ambiente. Tais informações são essenciais para a compreensão dos mecanismos de estabilização da MOS em condições de baixas temperaturas e vegetação natural preservada. Esse detalhamento pode, portanto, auxiliar em propostas de inclusão de novas classes para os níveis categóricos menos generalizados ou mais homogêneos (família e série) nas classes dos Organossolos Fólicos e Organossolos Háplicos.

Na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia (PNI), são observados solos rasos, de formação autóctone e com baixo grau de pedogênese. Adicionalmente, em função das baixas temperaturas, é comum o acúmulo de material orgânico, levando à formação de horizontes minerais com elevados teores de carbono orgânico e / ou horizontes de constituição orgânica, segundo o SiBCS. Por vezes, o acúmulo significativo de carbono orgânico associado ao aumento da espessura desses horizontes contribui para à formação de Organossolos (Santos et al., 2018). Na parte alta do PNI duas classes de Organossolos foram identificadas por Costa (2019), os Organossolos Fólicos (OO), formados em condições de boa drenagem; e os Organossolos Háplicos (OX), com drenagem impedida ou limitada e em maior expressão nos fundos de vales estreitos.

O estudo teve como objetivos: i) quantificar os teores de carbono orgânico lável em perfis de Organossolos formados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (PNI); b) quantificar os teores de carbono e o nitrogênio das substâncias húmicas da MOS desses perfis; c) avaliar as relações entre carbono e nitrogênio das frações húmicas, com base nas razões estequiométricas (C/N); e d) propor critérios para os níveis categóricos inferiores das classes dos Organossolos Fólicos e Háplicos, no SiBCS.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Meio físico e coleta de amostras

Os perfis foram descritos e coletados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia (PNI) localizado na Serra da Mantiqueira, na região Sudeste do Brasil, onde a vegetação é caracterizada pelos campos altitude (Barreto et al., 2013). A área territorial do PNI é de cerca de 28 mil hectares, sendo a extensão dos campos de altitude no PNI pequena parcela desse total (IBAMA, 1997; Barreto, 2013). Essa vegetação ocorre acima de 2 mil metros sendo composta por espécies endêmicas, rasteiras e de pequeno porte, com domínio de gramíneas adaptadas a baixa disponibilidade de nutrientes e às condições climáticas locais com grandes variações de temperaturas ao longo do dia e no ano (Barreto, 2013).

Foram utilizadas amostras de 16 perfis de Organossolos coletadas na profundidade de 0– 0,20 m. Maiores informações sobre os perfis podem ser obtidas em Costa (2019). As amostras, em alguns perfis, representam combinação de mais de um horizontes na profundidade estabelecida. Todos os perfis encontravam-se sob vegetação de campo de altitude e o clima foi classificado como Cwb (verão moderadamente quente e chuvoso). Entre os perfis estudados (Tabela 4) 13 foram classificados como OO, diferenciados em 2 grandes grupos (3º nível categórico), a saber: Organossolos Fólicos Sápicos (OOs) e Organossolos Fólicos Hêmicos (OOy). Os OX corresponderam a 3 perfis de solos representados por 3 grandes grupos (sápicos, hêmicos e fíbricos) com mesma subordem (típicos).

Foram extraídos do trabalho de Costa (2019) os dados dos atributos químicos e físicos dos solos (Tabela 5), a saber: pH: Acidez ativa; P: Fósforo disponível; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7.0; CTCEf: Capacidade de troca catiônica efetiva; V%: Saturação por bases; e DS: Densidade do solo (Tabela 5).

Tabela 4 Perfis de Organossolos na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia e a formação geológica sob as quais foram formados (Costa, 2019).

Símbolos		SiBCS	Formação Geológica
	Ooscamb1	Organossolos Fólicos Sápicos cambissólicos	Nefelina-sienitos-foiaitos
	Oosfragmen	Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários	Brecha magmática
	Ooslitico2	Organossolos Fólicos Sápicos líticos	Brecha magmática
OO (13 perfis)	Oostipico1		Nefelina-sienitos-foiaitos
	Oostipico2		Brecha magmática
	Oostipico5	Organossolos Fólicos Sápicos típicos	Granito alcalino
	Oostipico6		Quartzo-sienitos
	OostipicoX		Nefelina-sienitos-foiaitos
OOy (5 perfis)	Ooylitico2	Organossolos Fólicos Hêmicos líticos	Nefelina-sienitos-foiaitos
	Ooylitico3		Nefelina-sienitos-foiaitos

Tabela 5. Continua

Símbolos		SiBCS		Formação Geológica
		OOylytico4		Nefelina-sienitos-foiaitos
		OOylytico5		Quartzo-sienitos
		OOylytico6		Quartzo-sienitos
OXfi (1 perfil)		OXfitipico	Organossolos Háplicos Fíbricos típicos	Nefelina-sienitos-foiaitos
OX (3 perfis)	OXs (1 perfil)	OXstipico	Organossolos Háplicos Sápricos típicos	Sedimentos aluvionares
OXY (1 perfil)		OXYtipico2	Organossolos Háplicos Hêmicos típicos	Sedimentos aluvionares

Tabela 6 Atributos químicos dos horizontes superficiais dos perfis de Organossolos da parte alta do PNI.

SiBCS	pH	P	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC	CTC ef	V%	DS
OOscamb1	4,96	6,84	0,04	0,27	0,22	0,35	1,95	20,30	0,88	21,18	2,83	4,17	0,57
OOsframen	3,79	7,14	0,03	0,18	0,26	0,65	8,05	32,35	1,12	33,47	9,17	3,35	0,43
OOslítico2	4,55	19,03	0,02	0,12	0,04	0,75	0,77	12,50	0,92	13,42	1,69	9,20	0,60
Oostípico1	4,08	9,52	0,15	0,24	0,20	0,25	2,15	21,29	0,83	22,12	2,98	3,77	0,46
Oostípico2	4,27	7,55	0,06	0,24	0,11	0,49	4,65	21,70	0,89	22,59	5,54	3,95	0,52
Oostípico5	3,91	4,94	0,04	0,23	0,00	1,24	5,10	21,30	1,51	22,81	6,61	6,62	0,51
Oostípico6	4,40	4,54	0,02	0,17	0,39	1,06	3,70	23,75	1,64	25,39	5,34	6,37	0,50
OostípicoX	5,06	3,50	0,33	0,46	0,70	1,30	7,90	25,10	2,80	27,90	10,07	10,00	0,41
OOylítico2	4,34	11,00	0,04	0,38	0,17	0,43	2,95	23,60	1,02	24,62	3,97	4,15	0,39
OOylítico3	5,04	13,33	0,10	0,59	0,66	0,69	4,00	27,59	2,04	29,63	6,04	7,08	0,34
OOylítico4	4,29	14,15	0,08	0,45	0,00	0,45	6,00	31,00	0,98	31,98	6,98	3,06	0,32
OOylítico5	4,21	11,51	0,03	0,17	0,38	0,42	3,00	15,00	1,00	16,00	4,00	6,25	0,69
OOylítico6	4,18	5,21	0,08	0,15	0,17	1,28	4,20	17,60	1,68	19,28	5,88	8,71	0,33
OXfitípico	5,22	5,14	0,05	0,26	0,15	0,40	2,45	15,69	0,86	16,55	3,31	5,22	0,29
OXstípico	4,64	8,43	0,05	0,06	0,17	0,58	2,20	13,15	0,85	14,00	3,05	6,19	0,65
OXYtípico2	5,41	7,43	0,05	0,13	0,15	0,43	1,50	13,09	0,76	13,85	2,26	5,51	0,12

pH: Acidez ativa; P: Fósforo disponível; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; CTCef: Capacidade de troca catiônica efetiva; V%: Saturação por bases; e DS: Densidade do solo

4.4.2 Frações químicas da matéria orgânica do solo

Após a coleta do solo, as amostras foram secas ao ar, destorreadas e passadas por peneira de 2,00 mm obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA). Os teores de carbono total e o nitrogênio total foram determinados pelo método de combustão a seco, em analisador elementar

Perkin Elmer 2400 CHN no Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de Carbono e Nitrogênio (LABCEN), Santa Maria (RS). As análises foram feitas usando 1,0 ($\pm 0,1$) mg de amostra de terra macerada em almofariz e passado por peneira de 100 mesh (149 μm) (Nelson & Sommers, 1996; Sato et al., 2014). Posteriormente foi calculada a razão estequiométrica C/N.

O carbono orgânico lável foi quantificado via oxidação com solução de KMnO₄ 0,02 mol L⁻¹ (POXC) (Weil et al., 2003; Culman et al., 2012). Foram pesados aproximadamente 1.00 g de TFSA e transferidos para tubo de centrífuga de polipropileno de 50 mL, posteriormente foram adicionados 20 mL de KMnO₄ 0,02 mol L⁻¹. Em seguida, os tubos foram homogeneizados por 2 min em agitador horizontal à 240 oscilações min⁻¹. Após essa etapa, os tubos foram deixados em repouso na vertical para estabilização por 10 min. Após estabilização, 0,50 mL do sobrenadante foi pipetado e transferido para outro tubo de centrífuga de 50 mL contendo 49,50 mL de água destilada. A absorbância de cada amostra foi obtida por colorimetria a 550 nm com auxílio de espectrofotômetro. O POXC (mg kg⁻¹) foi calculado a partir da equação a seguir e posteriormente convertido em g kg⁻¹ de solo.

$$\text{POXC} = [0.02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \text{ Abs})] \times (9000 \text{ mg C mol}^{-1}) \times (0.02 \text{ L Wt}^{-1})$$

Em que: POXC = carbono orgânico lável extraído com KMnO₄; 0.02 mol L^{-1} = é a concentração inicial da solução de KMnO₄; a é a interceptação da curva padrão; b é a inclinação da curva padrão; Abs é a leitura da amostra em absorbância à 550 nm; 9000 mg é a quantidade de C oxidado por um mol de MnO₄ com Mn⁷⁺ sendo reduzido para Mn⁴⁺; 0,02 L é o volume da solução de KMnO₄ que reagiu com o solo; e Wt é a massa da amostra (kg) usada na reação.

Foi realizado o fracionamento químico da MOS para extração das frações húmidas: ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) humina (HUM), pelo método adaptado por Swift (1996) em Mendonça e Matos (2017). O método de extração segue os conceitos de solubilidade diferencial das substâncias húmidas estabelecidos pela International Humic Substances Society. Em seguida foram determinados os teores de C e N de cada uma dessas frações húmidas através da via úmida como descrito por Mendonça e Matos (2017).

Ao final desses procedimentos foram obtidos os teores de C e N das frações ácido fúlvico (CAF e NAF), ácido húmico (CAH e NAH) e humina (CHUM e NHUM) bem como a porcentagem que cada dessas frações representava (%CAF, %CAH, %CHUM, %NAF, %NAH e %NHUM) em relação aos teores de carbono e nitrogênio total do solo, o carbono e nitrogênio não humificado (%CNH e %NNH). Após a obtenção dos teores de carbono e nitrogênio das frações húmidas da MOS foram calculadas as relações estequiométricas (C/N) para cada fração obtendo-se assim a relação C/N do ácido fúlvico (AF-C/N), ácido húmico (AH-C/N) e humina (C/N-HUM). Também foram obtidos índices húmidos das relações entre o carbono e nitrogênio dos ácidos húmidos e ácidos fúlvicos (CAH/CAF e NAH/NAF), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e humina (CEA/CHUM e NEA/NHUM), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e carbono total e nitrogênio total (CEA/CT e NEA/NT). O extrato alcalino (EA) é resultado da soma dos conteúdos de carbono ou nitrogênio das frações AF e AH. Índices húmidos são valores numéricos (sem unidade) obtidos a partir das relações entre as frações húmidas da MOS.

4.4.3 Análises estatísticas

Os resultados foram analisados por meio de estatísticas descritivas através da ferramenta Tableau Public (Tableau Public, 2003). Foram calculadas as médias de três repetições e posteriormente confeccionados *boxplots* para avaliação da distribuição dos teores de carbono, nitrogênio, POXC e a distribuição dos conteúdos de C e N das frações húmicas. Gráficos de barra cumulativa foram confeccionados no Excel para demonstrar as porcentagens que cada uma das frações húmicas em relação aos conteúdos totais de C e N do solo. Através do RStudio foi realizada análises multivariadas através dos pacotes “Openxlsx”, “FactoMineR”, “Factoextra”, “Stats”, “Dendextend”, “Igraph” e “Ggplot2” permitindo observar as relações das variáveis estudadas com os perfis de solos avaliados.

Para elaborar a proposição de separação de classes no quinto nível categórico do SiBCS, foi analisada a distribuição do carbono orgânico lável e das frações húmicas da MOS, referentes aos valores quantitativos e qualitativos, que se destacaram pela magnitude e, ou, participação, além da capacidade de formação de grupos distintos em cada horizonte diagnóstico. Como análise auxiliar na tomada de decisão, fez-se uso da correlação de Pearson (Pearson, 1900) entre os teores de carbono orgânico lável, valores e índices das frações húmicas e os atributos químicos e físicos de cada amostra. Para essa análise foram adotados os valores de 5 e 10% de significância.

Para comparação nas classes propostas, os dados foram testados quanto à normalidade dos erros pela análise dos resíduos de acordo com o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965). e quanto à homocedasticidade das variâncias pelo teste de Bartlett (Bartlett, 1937). As variáveis que não apresentarem distribuição normal ou homocedasticidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e foram novamente testadas. Os dados foram avaliados por análise de variância (ANOVA) quando os pressupostos foram atendidos (variáveis transformadas ou não). Nos casos em que a transformação dos dados foi ineficiente, o teste de Kruskall-Wallis (Kruskall & Wallis, 1952), seguido pelo critério de diferença mínima significativa de Fisher (Fisher, 1935) foi utilizado como análise não-paramétrica. Esses testes foram realizados à 10% de significância, uma vez que neste trabalho a confiança é suficiente para estabelecer as classes de classificação. Todo o tratamento estatístico dos dados foi realizado no software R (R Core Team, 2020).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) são apresentados na Tabela 6. Os valores variaram de $\pm 81,0$ a $292,0 \text{ g kg}^{-1}$ e de $\pm 4,0$ a $16,0 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente. No perfil de OostipicoX foi quantificado o valor mais elevado de CT ($292,4 \text{ g kg}^{-1}$), não se enquadrando no intervalo dos quartis dos *Box Plots* (Figura 8). Sendo considerado como um “outlier”. Apesar de não terem sido observados *outliers*, os valores de POXC variaram de $0,87$ a $2,22 \text{ g kg}^{-1}$, observados nas amostras dos perfis de OOylitico3 e Oxytipico2, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 7 Carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) do solo e teores de carbono (CAF, CAH e CHUM) e nitrogênio (NAF, NAH e NHUM) das frações húmicas e carbono orgânico lável (POXC) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI.

SiBCS	POX	CT	NT	CAF	NAF	CAH	NAH	C	N
	C							----- g kg^{-1}	HUM
OOscamb1	1,60	140,2	8,80	18,40	0,99	21,49	0,86	48,20	4,21
OOsfragmen	1,97	200,4	13,20	15,93	0,90	30,75	1,08	53,12	4,15
OOslitico2	0,97	150,7	12,50	11,07	0,56	21,18	0,96	55,67	7,07
Oostipico1	0,97	115,9	8,00	14,50	0,83	26,64	0,85	56,12	4,39
Oostipico2	1,50	163,4	10,30	18,70	1,26	29,76	1,11	76,06	5,48
Oostipico5	1,97	123,7	7,30	21,15	0,92	22,83	0,83	58,79	4,08
Oostipico6	1,86	171,5	10,40	15,68	0,58	21,51	0,67	47,62	3,59
OostipicoX	1,75	292,4	11,70	18,66	0,76	40,43	1,32	121,48	7,28
OOylitico2	2,02	176,0	9,60	20,32	0,72	23,37	0,73	61,97	4,17
OOylitico3	0,87	221,7	12,70	23,66	0,90	33,99	1,17	96,67	6,81
OOylitico4	1,34	242,6	15,60	30,33	1,26	51,30	1,60	142,83	10,43
OOylitico5	1,25	81,3	4,40	14,50	0,83	26,64	0,85	56,12	4,39
OOylitico6	1,58	121,90	8,10	18,38	1,29	20,52	0,65	60,45	5,11
OXfitipico	1,06	158,20	10,10	16,70	1,93	30,11	1,20	60,21	4,40
OXstipico	1,01	129,00	8,90	4,51	0,42	15,11	0,45	17,49	2,17
Oxytipico2	2,22	163,10	8,90	23,91	0,89	27,22	0,86	104,24	6,93
Média	1,49	165,75	10,03	17,88	0,93	26,92	0,92	68,63	5,22

OOscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOsfragmen - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; Oostipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOslitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fibríco típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sápico típico; Oxytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

De maneira geral, as porcentagens de carbono e nitrogênio das frações húmicas (Figura 9) mostram a contribuição dessas frações para o carbono total do solo e podem ser interpretadas quanto à contribuição para a redução das emissões de CO₂. O carbono lável do solo (POXC) é a parte do carbono do solo que tem maior potencial de oxidação e, consequentemente, pode ser convertido mais rapidamente em CO₂. Os valores obtidos nos Organossolos estudados indicam

que em média 1,49 g kg⁻¹ desse carbono pode ser transformados em CO₂ devido a rápida oxidação. Os teores de POXC quantificados (Tabela 6) indicam que esses solos exigem maior atenção quanto a preservação ambiental, pois essa fração da MOS pode ser oxidada e perdida na forma de CO₂ devido sua elevada solubilidade. O POXC é apontado como bom preditor da estabilização da MOS em comparação a outras frações de carbono no solo (Hurisso et al., 2016). Culman et al. (2012) sugerem que o POXC reflete o comportamento mais processado e estabilizado do carbono lábil no solo.

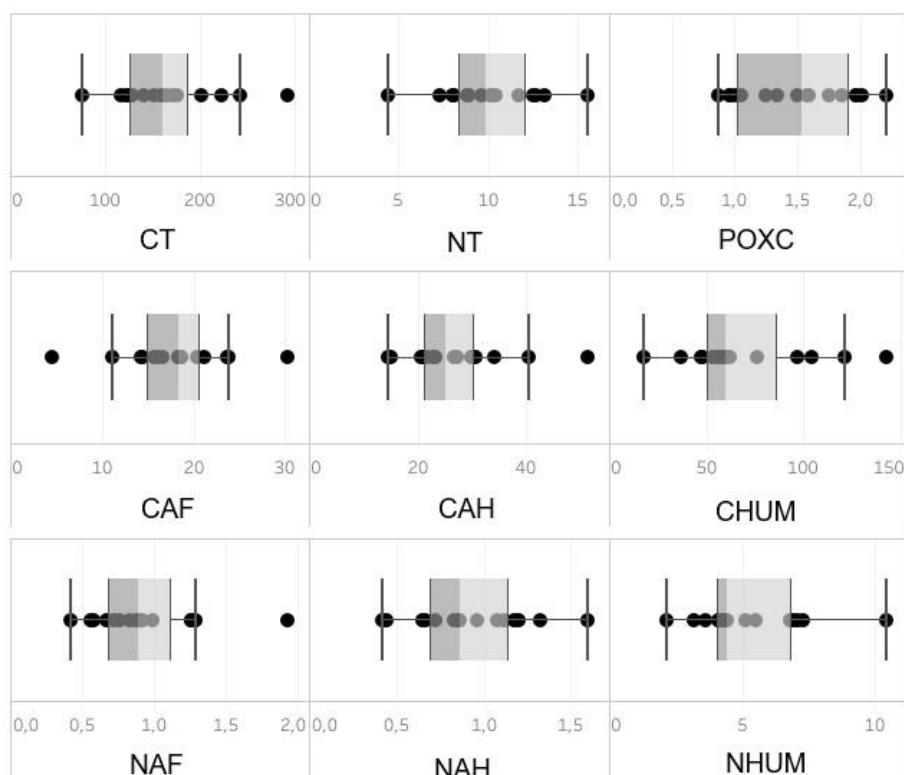


Figura 8 Box plot das variáveis carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono lábil (POXC), carbono do ácido fúlvico (CAF), carbono do ácido húmico (CAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), nitrogênio do ácido húmico (NAH) e nitrogênio da humina (NHUM) em amostras de perfis de Organossolos do PNI.

Para o perfil OOylitico4 foi quantificado o maior teor de carbono das frações húmicas, com destaque para as frações de CAF (30,33 g kg⁻¹), CAH (51,30 g kg⁻¹) e CHUM (142,83 g kg⁻¹) (Tabela 6). Essas variáveis (CAF, CAH e CHUM) no perfil de OOylitico4 apresentaram comportamento diferenciado em relação aos outros perfis sendo elas consideradas *outliers* nos *boxes plot* apresentados na Figura 8. Os menores teores de carbono nas frações húmicas foram observados nos perfis de OXstipico, com destaque para a FAC (4,51 g kg⁻¹), sendo esse perfil também considerado um “*outlier*” para essa fração (Figura 8). Nesse perfil também foram verificados os menores teores de carbono para CAH e CHUM (15,11; e 17,49 g kg⁻¹, respectivamente) mas essas frações não foram consideradas “*outliers*” na avaliação dos perfis por meio da análise de *Box Plots* (Figura 8) uma vez que essas variáveis se enquadram no intervalo específico definido pelos quartis do conjunto de dados. Apesar de serem considerados *outliers* (a fim de identificação) a importância desses dados não é diminuída, ao contrário, esses valores indicam características peculiares das amostras de solo e devem ser destacados.

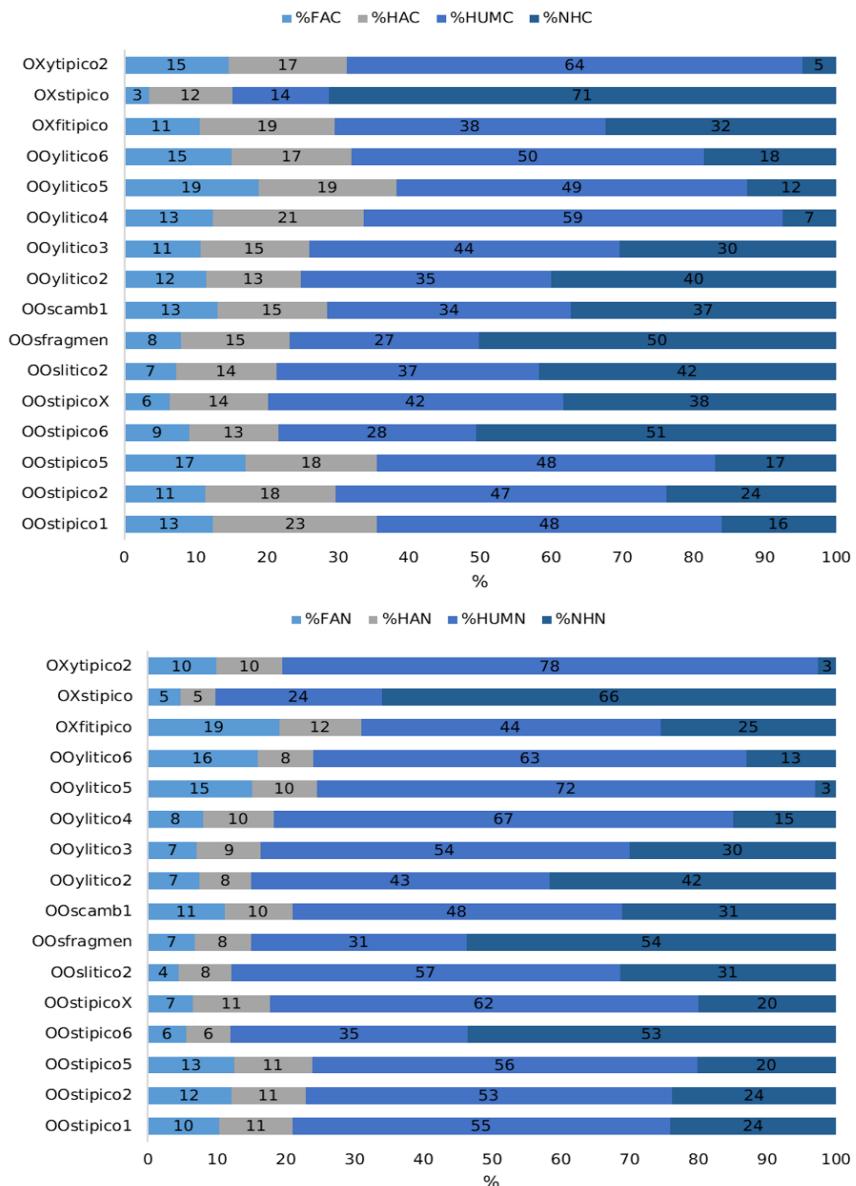


Figura 9. Percentual de carbono não humificado (%CNH) e das frações húmicas (%CAF, %CAH e %CHUM) em relação ao carbono total do solo em amostras de Organossolos no Parque Nacional de Itatiaia. Percentual de nitrogênio não humificado (%NNH) e das frações húmicas (%NAF, %NAH e %NHUM) em relação ao carbono total do solo em amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.

Ooscamb - Organossolos Fólicos Sápnicos cambissólico; Oosframen - Organossolos Fólicos Sápnicos fragmentários; Ooslítico - Organossolos Fólicos Sápnicos líticos; Oostipico - Organossolos Fólicos Sáprios típicos; Ooslítico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sápico típico; Oxytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico

Quanto aos teores de nitrogênio das frações húmicas, apenas um *outlier* positivo foi observado para a NAF do perfil de OXfitipico ($1,93 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 6 e Figura 8). Em relação aos teores de nitrogênio das frações ácido húmico e humina, no perfil de OOylitico4 foram quantificados os valores mais elevados para NAH ($1,60 \text{ g kg}^{-1}$) e NHUM ($10,43 \text{ g kg}^{-1}$). No perfil de OXstipico foram verificados os menores valores de FAN ($0,42 \text{ g kg}^{-1}$) e HUMN ($2,17$

g kg^{-1}). Enquanto no perfil de OOylitico5 observou-se os menores teores deste elemento para a fração NAH ($0,42 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 6).

Os teores de carbono quantificados nas frações húmicas neste estudo foram comparados com os obtidos por Valladares et al. (2016), em Organossolo Fólico Fíbrico típico, localizado na região sul do país e em área de pastagem. Os autores quantificaram teores de C das frações húmicas de $57,3 \text{ g kg}^{-1}$ para FAF, $84,2 \text{ g kg}^{-1}$ para a FAH e $235,2 \text{ g kg}^{-1}$ HUM. Em outro trabalho, ao analisar Organossolos Mésicos e Háplicos de diferentes pedoambientes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, Valladares et al. (2008a) encontraram valores de carbono da FAF variando entre 13 e 38 g kg^{-1} (valores médios de $17,8 \text{ g kg}^{-1}$); de FAH, entre 27 e 129 g kg^{-1} (valores médios de $68,8 \text{ g kg}^{-1}$); e de HUM, entre 10 e 139 g kg^{-1} (valores médios de 64 g kg^{-1}). Os teores de carbono em todas as frações dos Organossolos deste estudo foram inferiores aos encontrados por Valladares et al. (2008a), porém, os valores médios dos perfis avaliados pelos autores se assemelham os observados para as frações húmicas nesse estudo ($\text{CHUM} = 68,63 \text{ g kg}^{-1}$; seguida pela $\text{CAH} = 26,92 \text{ g kg}^{-1}$ e $\text{CAF} = 17,88 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 6). Verifica-se um decréscimo do conteúdo de carbono nas frações obedecendo a seguinte ordem $\text{C(HUM} > \text{CAH} > \text{CAF})$. Essa variação se deve ao processo de humificação que ocorre nesses solos resultando em fração HUM mais resistentes às transformações devido as suas características químicas (Piccolo et al., 2018).

Proporcionalmente, em relação ao CT e NT, verificou-se entre as frações húmicas dos perfis de solos avaliados as maiores porcentagens de carbono e nitrogênio na fração HUM (Figura 9). Para o percentual de CHUM, a menor contribuição foi observada na amostra do perfil de OXstipico (14%), com a maior parte do C na fração não humificada da MOS (%CNH, 71%). A maior contribuição de CHUM foi observada na amostra do perfil de OXytipico2 (64%). Em apenas três (3) amostras dos perfis avaliados as porcentagens de nitrogênio da fração HUM foram menores em comparação a fração não humificada, sendo eles OXstipico (24% para %NHUM; e 66% para %NNH), OOsfargmen (31% para %NHUM; e 54% para %NNH) e OOstipico6 (35% para %HUMN; e 53% para %HNN) (Figura 9). Esse padrão mostra que grande parte do nitrogênio está sendo diretamente armazenado na fração humina.

Estabelecendo relações matemáticas entre os teores de carbono e nitrogênio das frações húmicas, foram calculados os índices húmicos (Tabela 7). Os valores da relação entre os teores de carbono e nitrogênio das frações ácido húmico (CAH e NAH) e ácido fúlvico (CAF e NAF) são próximos a um (1,0) para o índice CAH/CAF (média geral de 1,61), com exceção para os perfis de OOstipico6 (2,17) e OXstipico (3,35) (Tabela 6). Para o índice NAH/NAF os valores variaram de 0,50 (OOylitico6) a 1,74 (OOstipicoX), com média geral para todos os perfis de 1,05 (Tabela 7).

Os valores para a relação CEA/CHUM foram inferiores a 0,88, exceto para o perfil de OXstipico (1,12) (Tabela 7). Para a relação NEA/NHUM, os valores variaram de 0,21 no OOslitico2 a 0,71 no OXfitipico com uma média geral entre os perfis de 0,38. A relação CEA/CT variou de 0,15 (OXstipico2) a 0,38 (OOylitico5) com média geral de 0,28. A relação entre NEA/NT variou de 0,10 no perfil OXytipico2 a 0,31 no OXfitipico com média geral de 0,19 (Tabela 7).

Tabela 8 Índices húmicos obtidos a partir da quantificação dos teores de C e N das frações húmicas da MOS em amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.

SiBCS	CAH/ CAF	CEA/ CHUM	CEA/C T	NAH/ NAF	NEA/ NHUM	NEA/N T
OOscamb1	1,17	0,83	0,28	0,87	0,44	0,21
OOsfragmen	1,93	0,88	0,23	1,20	0,48	0,15
OOslitico2	1,91	0,58	0,21	1,71	0,21	0,12
OOstipico1	1,84	0,73	0,35	1,02	0,38	0,21
OOstipico2	1,59	0,64	0,30	0,88	0,43	0,23
OOstipico5	1,08	0,75	0,36	0,90	0,43	0,24
OOstipico6	1,37	0,78	0,22	1,16	0,35	0,12
OOstipicoX	2,17	0,49	0,20	1,74	0,29	0,18
OOylitico2	1,15	0,71	0,25	1,01	0,35	0,15
OOylitico3	1,44	0,60	0,26	1,30	0,30	0,16
OOylitico4	1,69	0,57	0,34	1,27	0,27	0,18
OOylitico5	1,02	0,77	0,38	0,63	0,34	0,25
OOylitico6	1,12	0,64	0,32	0,50	0,38	0,24
OXfitipico	1,80	0,78	0,30	0,62	0,71	0,31
OXstipico	3,35	1,12	0,15	1,07	0,40	0,10
OXYtipico2	1,14	0,49	0,31	0,97	0,25	0,20
Média	1,61	0,71	0,28	1,05	0,38	0,19

CAH – carbono do ácido húmico; CAF – carbono do ácido fúlvico; CEA – carbono do extrato alcalino (CAH+CAF); CHUM – carbono da humina; CT – carbono total; NAH – nitrogênio do ácido húmico; NAF – nitrogênio do ácido fúlvico; NEA – nitrogênio do extrato alcalino (NAH+NAF); NHUM – nitrogênio da humina; NT – nitrogênio total. OOscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOsfragmen - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOslitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sáprico típico; OXYtipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

As frações húmicas da MOS e os índices húmicos obtidos podem ser utilizados na avaliação do seu grau de transformação. A relação entre os conteúdos de C de ácidos húmicos e ácidos fúlvicos (CAH/CAF) pode ser usada para inferir sobre a mobilidade do carbono no solo (Benites et al., 2003). Quanto maior for esse índice maior será a perda seletiva da fração AF, a mais solúvel. Já relação entre o extrato alcalino (EA = C-FAF + C-FAH) que é composto pelo C-FAF mais C-FAH e a humina (EA/HUM) representa a iluviação da MOS ou MOS estável (Benites et al., 2003). Para as amostras de horizontes superficiais os valores dessa relação comumente são inferiores a um (1,0). Valores de 0,5 são indicativos de grande estabilidade da MOS, em geral devido a interação com a fração mineral do solo (Benites et al., 2003). Valores altos dessa relação (próximos de 2,0) indicam a movimentação dentro do perfil das frações mais lábeis.

De maneira geral, avaliando as relações estequiométricas de carbono e nitrogênio das amostras de solo e das frações húmicas, foi verificado o padrão decrescente: AH-C/N > AF-C/N > C/N ≥ HUM-C/N (Tabela 8). A relação C/N variou de 25 nas amostras do perfil de OOstipicoX a 12 no perfil de OOslitico2. A relação HUM-C/N variou de 8 (OOslitico2 e OXstipico) a 17 (OOstipicoX); enquanto a relação AH-C/N variou entre 22 a 36 nas amostras dos perfis de OOslitico2 e OOylitico5, respectivamente (Figura 10).

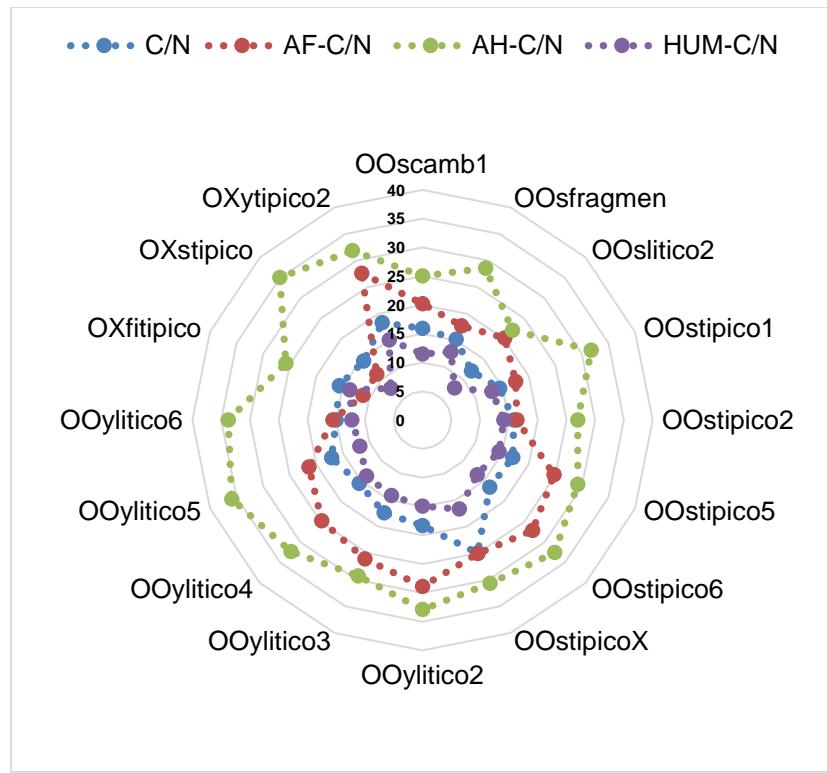


Figura 10 Relações entre C e N do solo (C/N) e das frações húmicas do solo (AF-C/N, AH-C/N e HUM-C/N) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI.

Ooscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOstipico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sárico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

Tabela 9 Relações entre C e N do solo (C/N) e das frações húmicas do solo (AF-C/N, AH-C/N e HUM-C/N) em amostras de perfis de Organossolos da parte alta do PNI.

SiBCS	C/N	AF-C/N	AH-C/N	HUM-C/N
Ooscamb1	16	20	25	11
OOslitico	15	18	29	13
OOstipico	12	20	22	8
OOstipico1	14	18	32	13
OOstipico2	16	16	27	14
OOstipico5	17	25	29	14
OOstipico6	16	27	33	13
OOstipicoX	25	25	31	17
OOylitico2	18	29	33	15
OOylitico3	17	26	29	14
OOylitico4	16	25	32	14
OOylitico5	17	21	36	12
OOylitico6	15	16	34	12
OXfitipico	16	11	26	14
OXstipico	14	11	35	8
OXytipico2	18	28	32	15
Média	16	21	30	13

Ooscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOstipico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sárico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico

Os valores da razão C/N foram menores quando comparados aos da razão FA-C/N em quase todos os solos, exceto para OXstipico (11) e OXfitipico (11) em que os valores da relação C/N foram de 14 e 16, respectivamente (Tabela 8).

Os valores das relações C/N das frações húmicas da MOS mostraram que, apenas as amostras dos perfis de OXfitipico e OXstipico não seguiram o padrão decrescente verificado (Figura 10). No OXfitipico os valores da razão HUM-C/N (14) foram maiores em comparação a razão FA-C/N (11); já no OXstipico os valores da razão FA-C/N (11) foram inferiores quando comparados aos valores da razão C/N do solo (14).

Em áreas de turfeiras no Sul do Brasil, Silva et al. (2009) avaliaram a relação C/N para os primeiros 20 cm de profundidade de três perfis de solos sob diferentes drenagens (P1 - drenagem moderada e P2 e P4 - má drenagem). Os valores da relação C/N dos perfis foi 35 para o P1, 25 para o P2 e 13 para o P3. A relação C/N do P2 se assemelhou a do perfil OOstipicoX neste estudo, sendo esse o maior valor observado entre as amostras dos perfis no PNI. Porém, diferindo dos solos estudados por Silva et al. (2009), o perfil OOstipicoX apresenta uma condição de boa drenagem no PNI. Os perfis em situação de má drenagem (OX) no PNI apresentaram relação C/N similar ao valor observado no P3 do trabalho de Silva et al. (2009).

Avaliando atributos morfológicos, físicos e químicos de Organossolos e solos com altos teores de MOS, Valladares et al. (2008b) encontraram valores de relação C/N média de 19,9. Os autores observaram correlação negativa entre a relação C/N do solo e o valor de pH em água. Esses valores aproximam-se dos encontrados nesse estudo conforme apresentado na Tabela 8.

O método de análise de componentes principais (ACP) foi aplicado para correlacionar os resultados das amostras dos perfis de solos com as variáveis de carbono e nitrogênio nas frações húmicas e suas respectivas razões estequiométricas para os Organossolos Fólicos (OO) (Tabela 9). Foi possível observar que a ACP explicou 62,7% da variação total dos dados para os dois primeiros CP (Figura 11 A). Enquanto para a classe dos Organossolos Háplicos (OX), a porcentagem de variação total dos dados foi de 100% para os dois primeiros CP (Tabela 9 e Figura 11 B).

Na ACP dos Organossolos Fólicos (OO) (Figura 11 A) o eixo um (PC1) teve contribuição de 40% para a variação dos dados, enquanto a dimensão dois (PC2) contribuiu com 20,7%. As variáveis carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da hum (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), carbono total (CT), nitrogênio total (NT) e a relação entre nitrogênio do ácido húmico e nitrogênio da humina (NAH/NAF) apresentaram correlações positivas (Tabela 9) e maiores que 0,70 com a PC1. Portanto, esse componente está diretamente relacionado com os teores de carbono e nitrogênio das amostras dos perfis de solos. Nesse mesmo eixo a variável CEA/CHUM apresentou correlação negativa de -0,70. Para a PC2 as variáveis CAF, NAF, CEA/CT e NEA/NT mostraram correlação positiva também de 0,70 (Tabela 9).

Tabela 10 Valores dos autovetores das variáveis na análise de componentes principais (ACP) em amostras de perfis de Organossolos Fólicos (OO) e Háplicos (OX) para as dimensões 1 e 2 (Dim1 e Dim2), na parte alta do PNI.

Variáveis	OO				OX	
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2
POXC	0,2063442	-0,567813268	0,03753468	0,51106682	0,6082057	0,793779441
TC	0,9418067	-0,001135657	0,19079112	0,24204244	0,9993730	0,035407239
TN	0,8714262	-0,178294017	-0,27271195	0,15312383	0,4129872	-0,910736807
FAC	0,5314062	0,705586871	0,03957321	0,04739646	0,9613898	0,275190360
FAN	0,1189938	0,725217062	-0,52705650	0,30403778	0,6654344	-0,746456318
AHC	0,8902435	0,361802035	-0,11950927	0,11335350	0,9608937	-0,276917652
AHN	0,9052848	0,193704603	-0,29505817	0,14202389	0,8452029	-0,534445489
HUMC	0,8966229	0,427716942	-0,01696614	-0,08598916	0,9070755	0,420968016
HUMN	0,8595714	0,203561085	-0,33055868	-0,29444702	0,8957038	0,444651129
C/N	0,3873049	0,227483853	0,73050555	0,17797357	0,7978396	0,602869762
FA-C/N	0,3807033	-0,035243663	0,75630329	-0,20848908	0,5795156	0,814961174
AH-C/N	-0,2007771	0,533982845	0,54264530	-0,14218538	-0,6965026	0,717554230
HUM-C/N	0,3658913	0,528052015	0,59969285	0,38574826	0,9958547	0,090958374
AHC/FAC	0,6794208	-0,350706636	-0,25367170	0,12464642	-0,9802599	-0,197713259
AEC/HUMC	-0,7090708	-0,144951881	0,03514443	0,44205849	-0,9310591	-0,364868277
AEC/TC	-0,5038769	0,717903812	-0,21267968	-0,29279245	0,9999984	0,001782481
AHN/FAN	0,7933313	-0,528158186	0,04399224	-0,12119158	-0,5655193	0,824735058
AEN/HUMN	-0,5385984	0,235919189	-0,10168760	0,77531304	0,1002114	-0,994966166
AEN/TN	-0,4867603	0,741546901	-0,17229437	-0,01687054	0,7871384	-0,616776389

Carbono lável (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fúlvico (CAF), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fúlvico (AF-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N), relação C/N da humina (CHUM-C/N), carbono do extrato alcalino (CEA) e nitrogênio do estrato alcalino (NEA),

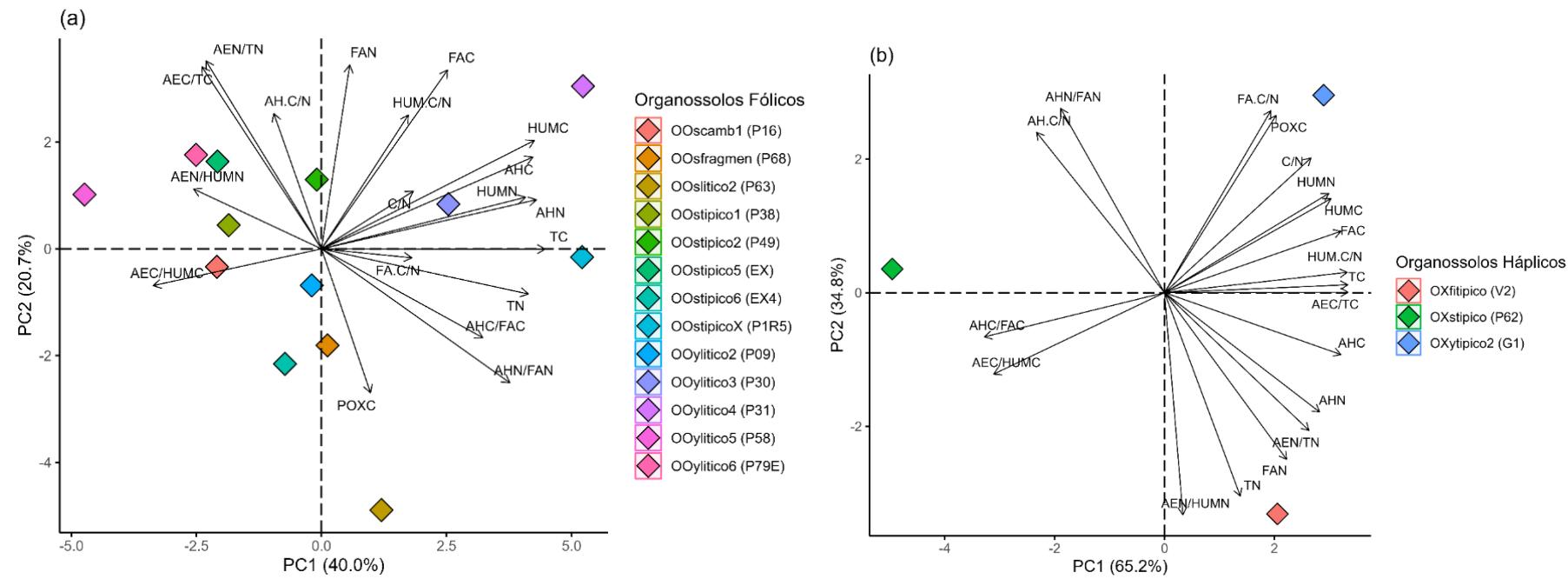


Figura 11 Análise de componentes principais das variáveis carbono lábil (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fúlvico (CAF), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fúlvico (AF-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N), relação C/N da humina (HUM-C/N) e relação entre as frações CAH/CAF, CEA/CHUM, CEA/CT, NAH/NAF, NEA/NHUM, NEA/NT em amostras de perfis de Organossolos Fólicos – OO – (A) e Organossolos Háplicos – OX – (B), na parte alta do PNI.

Ooscamb - Organossolos Fólicos Sápricos cambissólico; Oosfragmen - Organossolos Fólicos Sápricos fragmentários; Ooslitico - Organossolos Fólicos Sápricos líticos; Oostipico - Organossolos Fólicos Sápricos típicos; Ooslitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sáprico típico; Oxytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

Na ACP dos Organossolos Háplicos (OX) (Figura 11 B) a PC1 contribuiu com 65,2% da variação dos dados enquanto a PC2 com 34,8%. As variáveis que apresentaram correlação positiva de 0,70 (Tabela 9) para a PC1 dos OX foram: CT, CAF, CAH, NAH, CHUM, NHUM, C/N, HUM-C/N, CEA/CT e NEA/NT. Nesse mesmo eixo, as variáveis ACAH/CAF e CEA/CHUM apresentaram correlação negativa de que -0,90. Para a PC2, as variáveis que apresentam correlação positiva acima de 0,70 foram POXC, AF-C/N e AH-C/N. Vale destacar que as variáveis NT, NAF e NEA/NHUM apresentaram correlação negativa de -0,70 com a PC2 (Tabela 9).

Foi aplicado o método de ACP às amostras de perfis de Organossolos Fólicos Sápicos (OOs) e Organossolos Fólicos Hêmicos (OOy) (Figura 12 A e B, respectivamente), visando detalhar o padrão dos teores de carbono e nitrogênio e suas relações estequiométricas dentro dessas classes (Tabela 10). A ACP dos OOs explicou 68,5% (Figura 12 A) da variação dos dados e as ACP dos OOy explicaram 86% (Figura 12 B) da variação.

Para as amostras dos perfis de OOs (Figura 12 A), as variáveis que apresentam correlação positiva e acima de 0,70 com a PC1 foram CT, NT, NAH, CHUM, NHUM, CAH/CAF e NAH/NAF. As variáveis CEA/CHUM e CEA/CT apresentaram correlação negativa e acima de -0,70 para essa mesma dimensão ou eixo. A PC1 foi capaz de explicar 41,5% da variação dos dados. Para a PC2 as variáveis CAF, C/N, HUM-C/N e NEA/NT apresentaram correlação positiva com os valores, sendo estas superiores a 0,70. A PC2 foi capaz de explicar 27% da variação dos dados (Tabela 10).

Na ACP das amostras dos perfis de OOy (Figura 12 B), as variáveis CT, NT, CAF, CAH, NAH, CHUM, NHUM, CAH/CAF e NAH/NAF apresentaram valores de autovetores positivos e maiores que 0,90 na PC1. Esse eixo foi capaz de explicar 62,8% da variação dos dados da ACP. Nesse mesmo eixo destaca-se o valor negativo dos autovetores das variáveis AH-C/N, CEA/CHUM, NEA/NHUM e NEA/NT de -0,70 (Tabela 10). A PC2 explicou 23,2% da variação dos dados com valores positivos dos autovetores e acima de 0,70 para as variáveis NAF e CEA/CT. Nessa mesma dimensão as variáveis C/N e AF-C/N apresentaram correlação negativa de -0,70 (Tabela 10).

Tabela 11 Valores dos autovetores das variáveis na análise de componentes principais (ACP) em amostras dos Organossolos Fólicos Sápicos (OOs) e Organossolos Fólicos Hêmicos (OOy) para as dimensões 1 e 2 (Dim1 e Dim2), na parte alta do PNI.

Variáveis	OOs				OOy			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
POXC	0,63525241	-0,35211318	0,09703425	0,57053340	-0,05363427	-0,30845148	0,78740216	0,531016845
TC	0,86189698	0,37810034	-0,13672669	0,29668075	0,98948588	-0,11874952	0,07645157	-0,031167339
TN	0,76317405	-0,36062209	0,19883174	0,47560865	0,99184386	0,07763206	0,10038149	0,011940191
FAC	-0,28168905	0,84392959	-0,09848322	0,11959089	0,97378939	0,16760335	0,04480123	0,147092476
FAN	-0,39625794	0,59795837	0,63192411	0,17406891	0,41603298	0,77160570	0,47781417	-0,056875425
AHC	0,66761365	0,66349501	0,16225917	0,15692492	0,95327722	0,24687101	-0,07775106	0,155794784
AHN	0,72949408	0,45616715	0,49175352	0,08722392	0,97357135	0,21101967	-0,07226609	0,049062645
HUMC	0,73216761	0,64622508	0,04199064	-0,20307705	0,95354133	0,27906147	-0,04493457	0,104233003
HUMN	0,82925485	-0,01173708	0,31850484	-0,43293265	0,90309685	0,41604532	-0,03572983	0,100228518
C/N	0,52434113	0,75111666	-0,33775505	0,02050645	-0,07900475	-0,95927216	-0,27113662	-0,006332638
FA-C/N	0,19818256	0,09841281	-0,90363567	-0,10238398	0,53151019	-0,77999786	-0,24140069	0,225446157
AH-C/N	-0,08517256	0,51532055	-0,62586543	0,13375750	-0,78691235	0,26616769	-0,09124578	0,549179314
HUM-C/N	0,11785592	0,92373588	-0,29296317	0,13572553	0,68369215	-0,68568022	0,23607589	0,081705927
AHC/FAC	0,80824110	-0,03639969	0,26382468	0,00867618	0,96137800	0,23735474	-0,13043317	0,049012848
AEC/HUMC	-0,72016725	-0,18610019	-0,09913233	0,61891867	-0,87303229	-0,32653294	-0,24641817	0,265459864
AEC/TC	-0,79886756	0,34066157	0,19775675	-0,37310757	-0,41453289	0,70218420	-0,49036835	0,307634064
AHN/FAN	0,92101525	-0,27985971	-0,10669473	-0,17500779	0,91328760	-0,32569519	-0,24206731	-0,035097310
AEN/HUMN	-0,66884494	0,41407697	0,21632815	0,57211549	-0,82626073	-0,04835764	0,54207628	-0,145286102
AEN/TN	-0,51850143	0,70882897	0,34924251	-0,28983333	-0,71432074	0,68669628	-0,13137116	-0,030589537

Carbono lúbil (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fúlvico (CAF), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fúlvico (AF-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N), relação C/N da humina (CHUM-C/N), carbono do extrato alcalino (CEA) e nitrogênio do estrato alcalino (NEA).

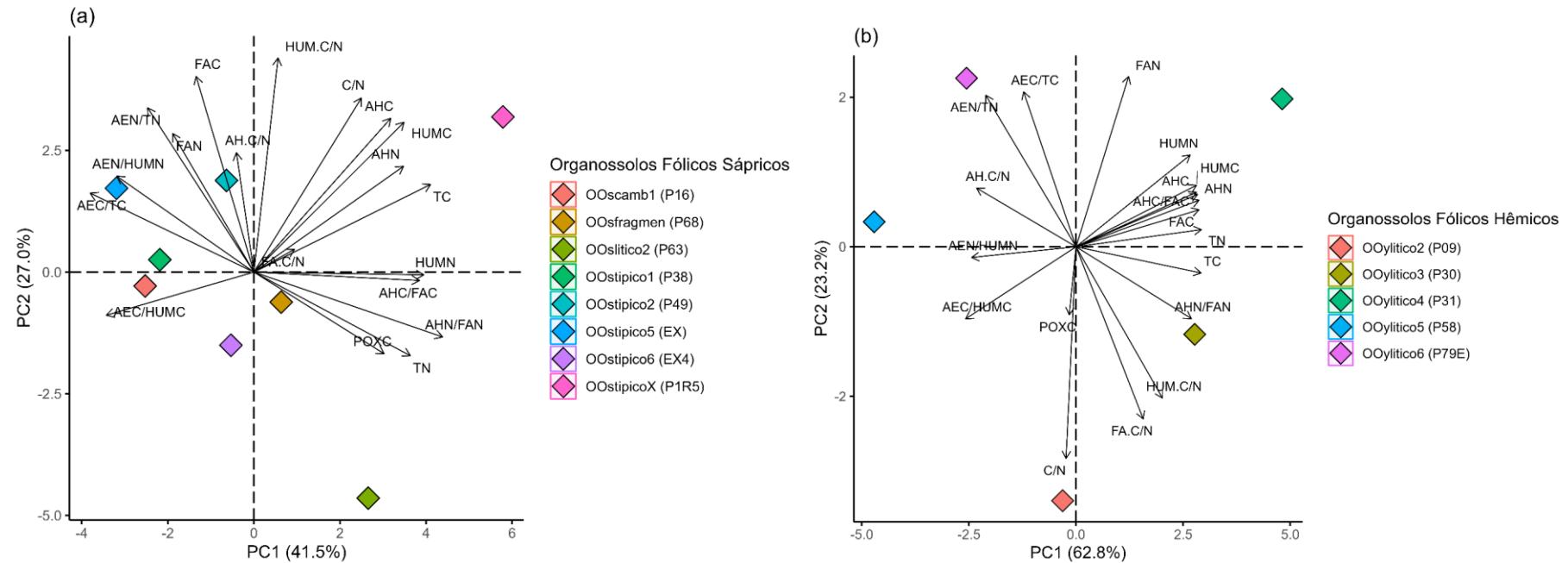


Figura 12 Análise de componentes principais das variáveis carbono lúbil (POXC), carbono total (TC), nitrogênio total (TN), carbono do ácido fúlvico (FAC), nitrogênio do ácido fúlvico (FAN), carbono do ácido húmico (AHC), nitrogênio do ácido húmico (AHN), carbono da humina (HUMC), nitrogênio da humina (HUMN), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fúlvico (FA,C/N), relação C/N do ácido húmico (AH,C/N), relação C/N da humina (HUM,C/N) e relação entre as frações AHC/FAC, AEC/HUMC, AEC/TC, AHN/FAN, AEN/HUMN, AEN/TN de amostras de perfis de solos classificados como Organossolos Fólicos Sápicos – OOs – (A) e Organossolos Fólicos Hêmicos – OOy – (B), na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia.

OOscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOsfragmen - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOsilitico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOsilitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sárico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

Utilizando as mesmas variáveis foi aplicada a análise de agrupamento hierárquico dos perfis de Organossolos na parte alta do PNI (Figura 13). Ao agrupar as amostras, observa-se a formação de quatro grupos distintos com cerca de 80% de dissimilaridade. O primeiro cluster é composto por amostras dos perfis de OOstipicoX, OOylitico3 e OOylitico4, sendo o cluster que mais se diferencia dos demais grupos formados. Dentro desse grupo, o perfil OOstipicoX se diferenciou dos demais, na qual as amostras dos dois perfis agrupados apresentam a mesma classificação (OOylitico) e são mais semelhantes entre si.

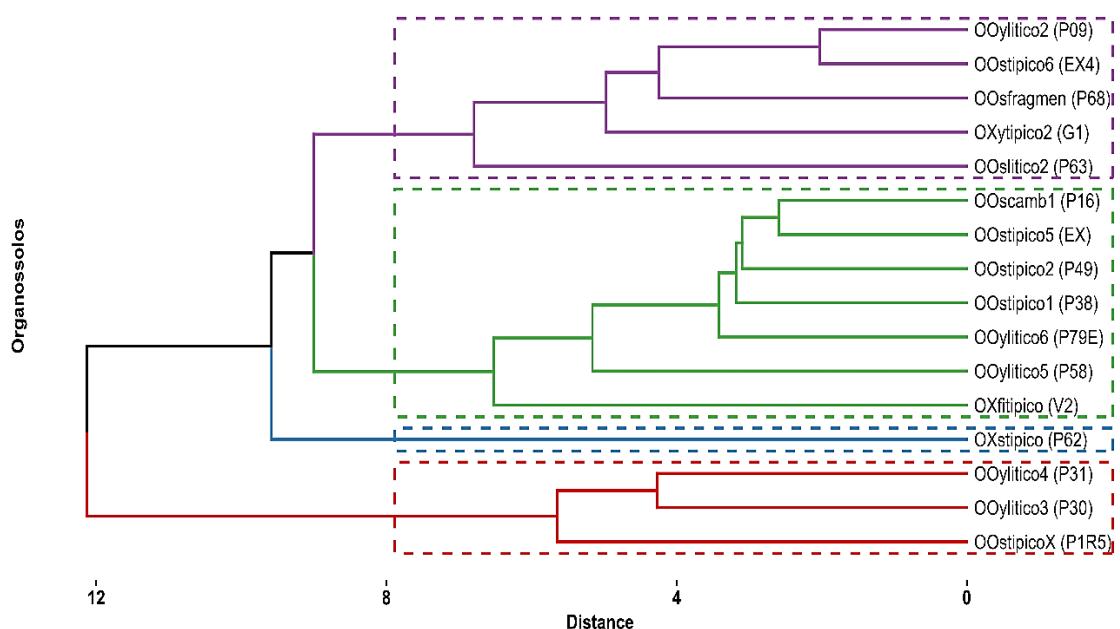


Figura 13 Análise de Cluster das amostras dos perfis de Organossolos observados na parte alta do Parque Nacional de Itatiaia conforme as variáveis: Carbono lúbil (POXC), carbono total (CT), nitrogênio total (NT), carbono do ácido fúlvico (CAF), nitrogênio do ácido fúlvico (NAF), carbono do ácido húmico (CAH), nitrogênio do ácido húmico (NAH), carbono da humina (CHUM), nitrogênio da humina (NHUM), relação C/N do solo (C/N), relação C/N do ácido fúlvico (FA-C/N), relação C/N do ácido húmico (AH-C/N) e relação C/N da humina (HUM-C/N).

OOscamb - Organossolos Fólicos Sápicos cambissólico; OOsframen - Organossolos Fólicos Sápicos fragmentários; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápicos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápicos típicos; OOslitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sárico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sárico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico.

O segundo cluster é composto por apenas uma amostra do perfil classificado como OXstipico. Esse solo apresentou padrão diferenciado em relação as quantidades de frações químicas da MOS, onde a maior parte do seu carbono não está na matéria orgânica humificada. O terceiro cluster é composto dos perfis de: OXfitipico, OOylitico5, OOylitico6, OOstipico1, OOstipico2, OOstipico5 e OOscamb1. Já o quarto cluster é formado dos perfis de OOslitico2, OXytipico2, OOsframen, OOstipico6 e OOylitico2.

Para validação, os horizontes foram submetidos à classificação proposta e comparados os dados dos atributos químicos (P , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , $H+Al$, CTC, CTCef, V% e SB) e físicos (Ds) das classes estabelecidas. Destaque para o atributo K^+ que apresentou correlações

significativas e positivas com os atributos CT (0,71), NT (0,50), CAF (0,65), CAH (0,71), NAH (0,67), CHUM (0,68), NHUM (0,54), CEA/CHUM (0,50), C/N (0,54), AF-C/N (0,50) e HUM-C/N (0,61) (Tabela 11). Esse resultado indica que o processo de humificação das classes de Organossolos altomontanos tem relação direta com a dinâmica do potássio trocável nesses solos, que em parte, pode ser explicado pela composição das rochas alcalinas que compõem o substrato mineral desses solos (Tabela 1, Capítulo 1). Para as variáveis H+Al e CTC foram verificadas correlações positivas significativas com os conteúdos de carbono das FAC (0,53), CAH (0,63) e CHUM (0,44 e 0,50, respectivamente) e com o conteúdo de nitrogênio da NAH (0,55). Quanto a densidade do solo (Ds), observou-se correlação negativa e com valores inferiores a -0,50 com as variáveis CAF (-0,67), NAF (-0,50), CHUM (-0,61), NHUM (-0,50), %CHUM (-0,53) HUM-C/N (-0,63). A Ds apresentou correlação positiva e com valor acima de 0,50 apenas com a variável CAH/CHUM (0,56) (Tabela 10).

Tabela 12 Matriz de correlação de Pearson entre as frações orgânicas (valores quantitativos e qualitativos) e os atributos químicos e físicos de amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.

ATRI	POXC	CT	NT	CAF	NAF	CAH	NAH	CHUM	NHUM	
pH H ₂ O	-0,10	0,3	0,10	0,12	0,16	0,10	0,17	0,30	0,24	
P	-0,51*	-0,02	0,33	0,03	-0,25	0,14	0,20	0,14	0,44**	
Na ⁺	0,05	0,59*	0,16	0,12	-0,03	0,50**	0,38	0,51*	0,33	
K ⁺	-0,11	0,71*	0,50**	0,65*	0,20	0,71*	0,67*	0,68*	0,54*	
Ca ²⁺	-0,07	0,50**	0,05	0,00	-0,23	0,21	0,14	0,21	0,02	
Mg ²⁺	0,30	0,24	0,03	0,01	-0,16	-0,07	-0,10	0,07	0,02	
Al ³⁺	0,35	0,64*	0,42	0,34	0,12	0,59*	0,51*	0,43**	0,25	
H+Al	0,22	0,65*	0,61*	0,53*	0,07	0,63*	0,55*	0,44**	0,31	
SB	0,13	0,59*	0,19	0,19	-0,14	0,28	0,22	0,37	0,20	
CTC	0,22	0,68*	0,60*	0,53*	0,05	0,63*	0,55*	0,50**	0,31	
CTC ef	0,33	0,66*	0,40	0,35	0,08	0,57*	0,50**	0,44**	0,25	
V%	-0,12	0,11	-0,10	-0,25	-0,26	-0,19	-0,14	0,03	0,10	
SD	-0,33	-0,43**	-0,34	-0,67*	-0,50**	-0,43**	-0,36	-0,61*	-0,50**	
ATRI	CAH/ CAF	CEA/ CHUM	CEA/CT	NAH/ NAF	NEA/ NHUM	NEA/ NT	C/N	AF-C/N	AH- C/N	HUM- C/N
pH H ₂ O	0,09	-0,29	-0,26	0,15	-0,02	0,08	0,37	0,08	-0,22	0,16
P	0,06	-0,20	0,00	0,38	-0,52*	-0,36	-0,50**	0,14	-0,22	-0,42
Na ⁺	0,27	-0,41	-0,15	0,43**	-0,20	0,04	0,73*	0,12	0,14	0,50**
K ⁺	-0,16	-0,50**	0,06	0,34	-0,14	0,04	0,54*	0,50**	-0,08	0,61*
Ca ²⁺	0,05	-0,16	-0,31	0,32	-0,17	-0,16	0,61*	0,26	0,21	0,35
Mg ²⁺	-0,05	-0,20	-0,21	0,22	-0,17	-0,11	0,35	0,19	0,09	0,15
Al ³⁺	0,07	-0,14	-0,06	0,26	0,05	-0,01	0,51*	0,15	0,14	0,53*
H+Al	-0,08	-0,13	-0,01	0,31	-0,02	-0,19	0,27	0,36	0,02	0,50*
SB	-0,02	-0,36	-0,25	0,41	-0,23	-0,11	0,69*	0,35	0,13	0,50**
CEC	-0,08	-0,15	-0,03	0,34	-0,04	-0,19	0,32	0,38	0,03	0,52*
CEC ef	0,04	-0,18	-0,09	0,29	0,00	-0,03	0,56*	0,21	0,15	0,54*
V%	0,09	-0,31	-0,31	0,33	-0,35	-0,12	0,29	0,07	-0,03	-0,12
SD	0,27	0,56*	-0,18	0,06	-0,01	-0,24	-0,29	-0,30	-0,03	-0,63*

Continua

Tabela 13 Final

ATRI	%CAF	%CAH	%CHUM	%CH	%CNH	%NAF	%NAH	%NHUM	%NH	%NNH
pH H ₂ O	-0,21	-0,25	0,10	-0,02	0,02	0,02	0,16	0,19	0,17	-0,17
P	-0,05	0,08	0,13	0,09	-0,09	-0,36	-0,21	0,20	0,06	-0,06
Na ⁺	-0,26	0,04	0,16	0,06	-0,06	-0,12	0,39	0,25	0,22	-0,22
K ⁺	-0,01	0,12	0,26	0,20	-0,20	-0,11	0,42**	0,19	0,17	-0,17
Ca ²⁺	-0,22	-0,32	-0,14	-0,21	0,21	-0,22	0,01	0,00	-0,05	0,05
Mg ²⁺	-0,09	-0,36	-0,07	-0,13	0,13	-0,11	-0,07	0,02	-0,02	0,02
Al ³⁺	-0,13	0,02	0,01	-0,02	0,02	-0,12	0,24	-0,05	-0,04	0,04
H+Al	-0,11	0,09	0,00	-0,01	0,01	-0,29	0,15	-0,17	-0,20	0,20
SB	-0,17	-0,31	-0,01	-0,10	0,10	-0,19	0,12	0,10	0,05	-0,05
CEC	-0,12	0,06	0,00	-0,02	0,02	-0,30	0,16	-0,16	-0,19	0,19
CEC ef	-0,13	-0,04	0,01	-0,03	0,03	-0,14	0,22	-0,03	-0,04	0,04
V%	-0,17	-0,42	-0,04	-0,14	0,14	-0,11	-0,12	0,22	0,14	-0,14
SD	-0,13	-0,19	-0,53*	-0,43**	0,43**	-0,18	-0,31	-0,34	-0,35	0,35

Valores em negrito: média correlação ($-0,50 \geq r \geq 0,50$), (*) Significativo a 5%, (**) Significativo 10%, Ausência de letra: Não significativo, pH: Acidez ativa; P: Fósforo disponível; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; Ca²⁺: Cálculo trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; CTcef: Capacidade de troca catiônica efetiva; V%: Saturação por bases; DS: Densidade do solo; CAH: carbono do ácido húmico; CAF carbono do ácido fúlvico; CEA: carbono do extrato alcalino (CAH+CAF); CHUM: carbono da humina; CT: carbono total; NAH: nitrogênio do ácido húmico; NAF: nitrogênio do ácido fúlvico; NEA: nitrogênio do extrato alcalino (NAH+NAF); NHUM: nitrogênio da humina; NT: nitrogênio total; C/N: relação entre carbono e nitrogênio do solo; AF-C/N: relação entre carbono e nitrogênio da fração ácido fúlvico; AH-C/N: relação entre carbono e nitrogênio da fração ácido húmico; HUM-C/N: relação entre carbono e nitrogênio da fração humina; %CNH: Percentual de carbono não humificado; %CAF: : Percentual de carbono da fração ácido fúlvico; %CAH: Percentual de carbono das fração ácido húmico; %CHUM: Percentual de carbono da humina; %NNH: Percentual de nitrogênio não humificado; %NAF: Percentual de nitrogênio da fração ácido fúlvico; %NAH: Percentual de nitrogênio da fração ácido húmico; e %NHUM: Percentual de nitrogênio da fração humina.

As variáveis selecionadas para serem usadas como atributos na classificação dos Organossolos foram baseadas em dois critérios, que são explicados a seguir. A primeira variável adotada foi a relação CEA/CT obtida através da análise das PCAs e do Cluster e os valores de HUM-C/N oriundos da correlação com os atributos químicos e físicos dos solos estudados. Os limites de cada variável foram determinados a partir de suas médias sendo o valor de 0,28 adotado para CEA/CT (Tabela 7) e o valor de 13 para a variável HUM-C/N (Tabela 8).

Apenas os atributos químicos associados a fertilidade do solo pH, Mg e SB não foram selecionados para o processo de validação da proposta, pois não apresentaram valores médios de correlação ($-0,50 \geq r \geq 0,50$) com nenhuma das variáveis associadas às frações químicas da matéria orgânica do solo (Tabela 11). Por esse motivo, não foram usados nas comparações dos atributos do solo através das classes propostas pela relação CEA/CT (obtidos através da análise das PCAs e do Cluster) e pelos valores de HUM-C/N (obtidos através da análise correlação com os atributos químicos e físicos dos Organossolos na parte alta do PNI) (Tabela 11).

Tabela 14 Comparações dos atributos do solo a partir da classificação proposta pela relação AEC/TC e HUM-C/N para amostras de perfis de Organossolos na parte alta do PNI.

Atributos	Alcalino-solúvel (n = 09)	Hipoalcalino-solúvel (n = 07)
P (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾	8,03 a	9,57 a
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	0,07 a	0,09 a
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	0,24 a	0,28 a
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,15 b	0,34 a
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	3,44 a	4,22 a
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	19,66 a	22,58 a
SB (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	1,04 a	1,48 a
CTC (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	20,71 a	24,06 a
CTC ef (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	4,49 a	5,62 a
Ds (Mg m ⁻³) ⁽¹⁾	0,42 a	0,47 a

Atributos	Humina-mineralizável (n = 08)	Hipohumina- mineralizável (n = 08)
P (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾	8,38 a	9,03 a
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	0,09 a	0,05 b
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,34 a	0,17 b
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	0,24 a	0,23 a
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	4,32 a	3,25 a
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	22,38 a	19,49 a
SB (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	1,37 a	1,12 a
CTC (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	23,74 a	20,61 a
CTC ef (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	5,60 a	4,37 a
Ds (Mg m ⁻³) ⁽¹⁾	0,36 b	0,53 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem as classes de solos propostas para o quinto nível categórico, ⁽¹⁾ANOVA sem transformações de dados a 10% de probabilidade; e ⁽²⁾ANOVA com transformações de dados a 10% de probabilidade, ⁽³⁾Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni, P: Fósforo disponível; Na⁺: Sódio trocável; K⁺: Potássio trocável; Ca²⁺: Cálcio trocável; Al³⁺: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; CTCef: Capacidade de troca catiônica efetiva; e Ds: Densidade do solo,

Verificou-se diferença significativa apenas para o atributo Ca²⁺, em que os maiores teores foram observados na classe hipoalcalino-solúvel (Tabela 12). Entre as classes propostas, humina-mineralizável e hipohumina-mineralizável, constatou-se diferença significativa para os atributos químicos Na⁺ e K⁺, com maiores teores na classe humina-mineralizável; e o atributo físico Ds, com valores mais elevados para a classe hipohumina-mineralizável (Tabela 12).

As propostas de classificação para o 4º nível categórico dos Organossolos no SiBCS, de Fontana et al. (2008b) e Valladares et al. (2003), adotam conteúdos de C das frações AF (=20,0 g kg⁻¹: hipofúlvico; >20,0 g kg⁻¹: fúlvico) e AH (=90,0 g kg⁻¹: hipohúmico; >90,0 g kg⁻¹: húmico) e o índice entre a relação entre CEA/HUM (=1,0: hipoalcalino-solúvel; >1,0 alcalino-solúvel), Fontana et al. (2011) sugerem o emprego da relação C-FAH/C-FAF para classificar solos com horizontes orgânicos (O e H) em níveis hierárquicos inferiores, com valores menores ou iguais a 2,0 (fúlvico-húmico) e maiores que 2,0 (hiperhumíco) para os O hísticos e menores ou iguais a 5,0 (fúlvico-húmico) e maiores que 5,0 (hiperhumíco) para os H hísticos.

A relação entre o carbono do extrato alcalino (CAF+CAH) e o carbono total do solo indica quanto do carbono está sob a forma mais funcional. Segundo a análise de cluster neste estudo (Figura 13) observa-se que o valor do índice obtido entre extrato alcalino e carbono total (CEA/CT) foi uma das variáveis que permitiu a separação de grupos distintos. O valor abaixo de 0,28 indica que menos de 28% do carbono solo encontra-se sob a forma de AH e AF, Baseando-se nas propostas de classificação sugeridas por Fontana et al. (2008b) e Valladares et al. (2003), os termos hipoalcalino-solúvel ($<0,28$) e alcalino-solúvel ($\geq0,28$), podem ser aplicados para a classificação dos Organossolos na parte alta do PNI.

Quanto à determinação das variáveis necessárias para implementar essa classificação, a separação de substâncias húmicas é feita a partir da adição de solução alcalina (hidróxido de sódio ou pirofosfato de sódio) à amostra resultando em resíduo insolúvel denominado humina e na solução alcalina contendo os AF e AH. Assim, a quantificação do C da solução alcalina e o teor de carbono total do solo são suficientes para determinar esse atributo diagnóstico e, assim, utilizar a caracterização das substâncias húmicas nos Organossolos como critério do SiBCS, no nível de família.

A relação C/N da fração humina (HUM-C/N) permitiu diferenciar Organossolos na parte alta do PNI. A humina representa a fração mais estável da MOS, logo, em geral, no processo de transformação da MOS muitos compostos nitrogenados são mineralizados, favorecendo a maior proporção entre carbono e nitrogênio na humina. Nota-se que os valores de relação entre C e N da humina, obtidos nesse estudo, são considerados baixos e isso pode estar associado as condições em que esses solos se encontram. O ambiente de montanha, com menores temperaturas, e a vegetação de campos de altitude, a qual fornece constante entrada de material fresco ao sistema, desfavorecem os processos de transformação da matéria orgânica.

A variável HUM-C/N apresentou correlação significativa com a maioria dos atributos químicos e físicos. Para a classificação de níveis hierárquicos inferiores dos Organossolos no SiBCS se recomendam atributos relacionados com o uso e manejo dos solos. Como mencionado, os solos no PNI se encontram em condições naturais, mas nota-se a influência do Na^+ , K^+ , Al^{3+} , H+Al , SB, CTC, CTC ef e Ds sobre a relação entre C e N da fração humina.

Ao comparar os atributos do solo a partir das classificações propostas (Tabela 12) para a variável CEA/CT o atributo Ca^{2+} foi o único que permitiu a diferenciação entre as classes de solos. Quando comparados os atributos do solo com a variável HUM-C/N observou-se diferença significativa para Na^+ e K^+ , permitindo a diferenciação entre as classes. As substâncias húmicas contêm grupos funcionais, como ácidos carboxílicos e fenólicos, que podem se ligar aos elementos citados (Yang et al., 2021). Sabe-se que o cálcio tende a formar complexos mais estáveis com as substâncias húmicas, devido à sua alta carga eletrostática, enquanto o sódio e potássio formam ligações menos estáveis. Além disso, as substâncias húmicas podem representar um reservatório de nutrientes (Ca^{2+} e K^+) para as plantas, o que é apontado por Crawford (2021) como razão para que o sistema natural onde geralmente se encontram os Organossolos se sustente ao longo do tempo.

Ainda para a variável HUM-C/N observou-se que o atributo físico Ds pode ser usado para a diferenciação entre as classes de solo propostas. A relação entre carbono e nitrogênio da humina com a Ds está associada a quantidade de MOS e as condições em que esse material se encontra, uma vez que a maior quantidade de carbono é observada na fração humina.

Uma proposta de critérios diferenciais para o quinto nível categórico da classe dos Organossolos é apresentada na Tabela 13. A adoção desses atributos diagnósticos no SiBCS permitirá expressar a funcionalidade e a quantidade das substâncias húmicas presentes nos Organossolos, além de serem métodos de menor complexidade e de quantificação relativamente precisa. Além disso, o emprego do carbono total do solo e da sua relação com os conteúdos de

C do extrato alcalino pode ser útil na classificação de outros solos com alto teor de matéria orgânica mas que apresentam minerais como os carbonatos na sua matriz mineral.

Tabela 15 Proposta de classificação para quinto nível categórico de Organossolos no SiBCS, conforme os grupos obtidos com a análise de Cluster e a relação entre extrato alcalino das substâncias húmicas e o carbono total do solo.

Perfil	HUM-C/N	CEA/CT	Sugestão de Classificação no SiBCS
Grupo 1			
OOylitico2	15	0,25	Organossolo Fólico Hêmico lítico hipoalcalino-solúvel humina-mineralizável
OOstipico6	13	0,22	Organossolo Fólico Sáprico típico hipoalcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OOsfragmen	13	0,23	Organossolo Fólico Sáprico fragmentário hipoalcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OXytipico2	15	0,31	Organossolo Háplico Hêmico típico alcalino-solúvel humina-mineralizável
OOslitico2	8	0,21	Organossolo Fólico Sáprico lítico hipoalcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
Grupo 2			
OOscamb1	11	0,28	Organossolo Fólico Sáprico cambissólico alcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OOstipico5	14	0,36	Organossolo Fólico Sáprico típico alcalino-solúvel humina-mineralizável
OOstipico2	14	0,30	Organossolo Fólico Sáprico típico alcalino-solúvel humina-mineralizável
OOstipico1	13	0,35	Organossolo Fólico Sáprico típico alcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OOylitico5	12	0,38	Organossolo Fólico Hêmico lítico alcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OOylitico6	12	0,32	Organossolo Fólico Hêmico lítico alcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
OXfitipico	14	0,30	Organossolo Háplico Fíbrico típico alcalino-solúvel humina-mineralizável
Grupo 3			
OXstipico	8	0,15	Organossolo Háplico Sáprico típico hipoalcalino-solúvel hipohumina-mineralizável
Grupo 4			
OOylitico4	14	0,34	Organossolo Fólico Hêmico lítico alcalino-solúvel humina-mineralizável
OOylitico3	14	0,26	Organossolo Fólico Hêmico lítico hipoalcalino-solúvel humina-mineralizável
OOstipicoX	15	0,20	Organossolo Fólico Sáprico típico hipoalcalino-solúvel humina-mineralizável

OOscamb - Organossolos Fólicos Sápricos cambissólico; OOsfragmen - Organossolos Fólicos Sápricos fragmentários; OOslitico - Organossolos Fólicos Sápricos líticos; OOstipico - Organossolos Fólicos Sápricos típicos; OOslitico - Organossolos Fólicos Hêmicos líticos, OXfitipico - Organossolo Háplico Fíbrico típico; OXstipico - Organossolo Háplico Sáprico típico; OXytipico - Organossolo Háplico Hêmico típico,

4.6 CONCLUSÕES

Os teores de carbono orgânico lável apresentaram pequena amplitude de variação entre os perfis, com destaque para os baixos teores de carbono oxidável nas amostras dos perfis de Organossolo Fólico Hêmico lítico 3 ($0,87 \text{ g kg}^{-1}$) e os maiores valores nas do Organossolo Háplico Hêmico típico 2 ($2,22 \text{ g kg}^{-1}$).

Os teores de carbono e nitrogênio total do solo e das frações húmicas, apresentaram ampla variação de valores, principalmente nas amostras do perfil de Organossolo Fólico Hêmico lítico. Os teores mais elevados de C e N das frações húmicas foram quantificados nas amostras do perfil Organossolo Fólico Hêmico lítico, e os menores nas do Organossolo Háplico Sáprico típico.

Os índices das relações entre o carbono e nitrogênio dos ácidos húmicos e ácidos fúlvicos (médias de CAH/CAF = 1,61 e NAH/NAF = 1,05), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e humina (médias de CEA/CHUM = 0,71 e NEA/NHUM = 0,38), carbono e nitrogênio do extrato alcalino e carbono total e nitrogênio total (médias de CEA/CT = 0,28 e NEA/NT = 0,19) obtidos a partir do fracionamento da MOS mostraram diferenças no grau de humificação das amostras dos perfis de Organossolos.

Foi observado o seguinte padrão decrescente para os valores das relações estequiométricas de carbono e nitrogênio do solo e das frações húmicas: AH-C/N > AF-C/N > C/N \geq HUM-C/N. Exceto para as amostras dos perfis de Organossolo Háplico Fíbrico típico e de Organossolo Háplico Sáprico típico.

Como característica diferencial no quinto categórico do SiBCS, para as classes dos Organossolos Fólicos e Háplicos, é proposto critério com base na relação entre o carbono do extrato alcalino e o carbono total do solo, com as seguintes classes: hipoalcalino-solúvel ($\text{CEA/CT} < 0,28$) e alcalino-solúvel ($\text{CEA/CT} \geq 0,28$); além da relação entre carbono e nitrogênio da fração humina com as classes: hipohumina-mineralizável ($\text{HUM-C/N} \leq 13$) e humina-mineralizável ($\text{HUM-C/N} > 13$).

5 CONCLUSÕES GERAIS

A avaliação dos solos com alto teor de matéria orgânica na parte alta do PNI mostrou informações importantes sobre a fragilidade desses solos diante de mudanças ambientais, além de enfatizar a sua importância em termos de serviços ecossistêmicos prestados.

As funções de pedotransferência desenvolvidas por Beutler et al. (2017) permitiram estimar a densidade do solo em amostras do horizonte superficial de elevado teor de matéria orgânica, nos quais esse atributo não foi analisado anteriormente. Desta forma, foi possível quantificar os estoques de carbono (C) e o nitrogênio (N) nos solos estudados na parte alta do PNI com a substituição de dados faltantes.

Para os Cambissolos verificaram-se valores médios de estoques de C e N de 830,4 Gg e 53,1Gg, respectivamente, valores esses inferiores aos observados para os Organossolos (2.241,9 Gg e 137,8, respectivamente). Embora os Cambissolos ocupem maior área (10.254,4 ha) na parte alta do PNI, em função dos maiores estoques de C nos perfis de Organossolos, o estoque total de C total em toda a área (4.148,4 ha) de Organossolos é mais que duas vezes e meia (2,7 vezes) o valor para os Cambissolos. Esse mesmo padrão pode ser observado para os estoques de N. Este resultado ressalta a importância da proteção desses solos para a unidade de conservação (PNI) e pelos serviços ecossistêmicos prestados.

De uma forma geral, a constituição orgânica dos horizontes superficiais dos perfis de solos avaliados na parte alta do PNI se expressa em forte relação entre os atributos: conteúdos de C e N, valor de CEC, t e de H+Al. Para os perfis de Cambissolos, esses atributos apresentaram relação ainda maior com os estoques de C e N.

Os índices das relações entre o carbono e nitrogênio dos ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, carbono e nitrogênio do extrato alcalino e humina, carbono e nitrogênio do extrato alcalino e carbono total e nitrogênio total, obtidos a partir do fracionamento da MOS, podem ser usados para avaliar o grau de humificação dos perfis de Organossolos.

As propriedades da MOS e as relações entre as frações húmicas são relevantes como características diferenciais para o quinto categórico dos Organossolos Fólicos e Háplicos no SiBCS. Da mesma forma, esses indicadores são recomendados para avaliar o grau de mineralização da matéria orgânica desses solos, contribuindo para o monitoramento de processos de alteração diante de mudanças climáticas ou ações antrópicas e para a preservação desses solos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É indiscutível que o clima global é mutável ao longo do tempo, sendo que as ações decorrentes do aumento populacional no planeta Terra, no século passado e corrente, aceleram essas mudanças, o que tem levado a ocorrência de eventos climáticos extremos e perigosos para a própria existência do ser humano. O caminho que os seres humanos devem percorrer é o mesmo que a maioria dos seres vivos fazem, se adaptar, ou serão, como tantas espécies, extintos. Mas é importante ressaltar que se deve aprender com os erros e usar o conhecimento científico de forma inteligente e sábia para garantir o futuro desta e das próximas gerações.

A preservação da biodiversidade e dos biomas é fundamental nessa adaptação, com os seus diferentes ecossistemas de variadas espécies e infinidades de genes. Essa biodiversidade está diretamente relacionada com a prestação de serviços ecossistêmicos (SE). Ainda não há um consenso sobre o significado explícito e consistente do termo SE. De maneira geral, os conceitos destacam a importância dos serviços ecossistêmicos como bens e serviços derivados das funções ecossistêmicas que beneficiam a humanidade. Já as funções ecossistêmicas são compreendidas como os processos naturais e as relações entre os elementos que compõem um ecossistema que garantem o equilíbrio ambiental, como exemplos, a transferência de energia, a ciclagem de nutrientes e a regulação de gases e do ciclo da água.

O tema serviços ecossistêmicos têm aumentado sua visibilidade nas agendas governamentais e organizações civis, tendo como principal objetivo proteger e restaurar sistemas vitais, examinando os desafios ambientais e melhorando a resiliência ao uso da terra e perante mudanças climáticas. Compreender as relações entre as funções dos ecossistemas e as demandas da sociedade humana é fundamental para a tomada de decisões, planejamento e proposição de políticas públicas visando ao desenvolvimento sustentável.

Atualmente o foco das pesquisas sobre o tema serviços ecossistêmicos está na criação de cenários, em múltiplas escalas, que abordem a degradação ambiental, ilustrando desafios e soluções. Esses cenários envolvem colaborações entre as várias partes interessadas, incluindo os governos, a academia, instituições privadas, organizações ambientais e a sociedade em geral, para desenvolver estratégias que aumentem a resiliência dos ecossistemas, naturais e antropizados, e garantam a provisão sustentável dos serviços ecossistêmicos.

The United Nations Environment Programme (UNEP) tem sido, desde 1972, um importante programa da ONU fornecendo liderança e incentivando parcerias para a preservação do meio ambiente e, consequentemente, da biodiversidade (UNEP, 2025). A plataforma Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), estabelecida em 2012 e composta por 94 governos (IPBES, 2015), é atualmente um órgão intergovernamental independente criado para fortalecer a interface entre ciência e políticas públicas, no que diz respeito à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos.

É difícil imaginar como será o futuro, mas não é impossível idealizá-lo, como um futuro socialmente justo, economicamente viável e acima de tudo saudável. Sabe-se que o solo, o nosso chão, tem papel fundamental em toda a adaptação necessária para alcançar esse ideal.

Considerando que há muitos “chãos” a adoção de uma variável específica e mensurável, tal como a quantificação dos estoques de C e N das frações orgânicas do solo, pode ser

importante para avaliação e monitoramento de impactos sobre o solo e, em consequência, sobre os seus serviços ecossistêmicos. Para tal, mais estudos, de longa duração e em diferentes ambientes, quanto ao efeito de mudanças climáticas sobre essa variável, são também necessários.

Como discutido ao longo de toda a tese, as regiões montanhosas apresentam enorme complexidade e diversidade, exigindo abordagem integrada de várias ciências para entender e valorizar os serviços que elas oferecem. Os principais serviços ecossistêmicos em regiões montanhosas são: a provisão de água, regulação climática, conservação da biodiversidade e suporte às comunidades locais e, na parte alta do PNI, estão diretamente relacionados aos solos com horizontes orgânicos, como os Organossolos. Assim, a quantificação das frações orgânicas do solo é importante para o monitoramento de solos de áreas frágeis do PNI. Entender o comportamento dessas frações no ambiente demanda tempo e investimento em pesquisa. Mas as informações obtidas e sua aplicação no monitoramento de ecossistemas são muito valiosas, para tomadas de decisões seguras sobre os recursos solo, água e biodiversidade.

A proposição de novos critérios para classificação de Organossolos para o SiBCS vem sendo trabalhada por poucos pesquisadores e ainda há muitas perguntas que carecem de melhor explicação ou entendimento. Sabe-se que as propriedades dos solos orgânicos estão diretamente relacionadas com a matéria orgânica. Ainda, por representar até 95% de todo o carbono do solo, as frações húmicas têm relevância significativa na avaliação desses solos.

A matéria orgânica depositada no solo é composta por materiais diversificados e em vários estágios de decomposição. Portanto, alguns solos orgânicos podem apresentar material menos alterado, fragmentado grosseiramente e ainda preservando as características das plantas que os originaram, outros podem ter material mais decomposto, ou seja, quimicamente mais transformado. No SiBCS, essa avaliação é realizada através dos atributos teores de fibras esfregadas e solubilidade do material orgânico em pirofosfato de sódio, além de avaliações visuais em campo e os índices de avaliação de decomposição de von Post (SiBCS, Santos et al., 2018). A combinação desses atributos resulta na classificação dos Organossolos no terceiro nível categórico nos grandes grupos fíbricos, hêmicos e sápricos.

Para a classificação dos níveis hierárquicos seguintes, especialmente o quinto e sexto nível categórico (famílias e séries), ainda é bastante discutido quais atributos podem indicar as condições do solo relevantes para o uso e manejo, em especial nos solos orgânicos. O que evidencia a importância de pesquisas para relacionar o manejo desses solos, tendo em vista sua relevância e também fragilidade, para a validação de critérios diagnósticos.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que um caminho pode ser a comparação entre as frações orgânicas “leves” e as frações químicas da MOS. Essa relação pode indicar a forma de se manejar esses solos, em função de sua maior fragilidade; por exemplo, mais biomassa seca aumentando os riscos de incêndios ou material mais transformado com maior repelência de água. Além disso, a classificação dos solos em níveis taxonômicos inferiores pode ser uma das ferramentas para avaliação dos SE, indicando o potencial de serviços prestados (filtrar poluentes, armazenar carbono e regular o ciclo da água), contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e proteção dos recursos hídricos. Da mesma forma, ressalta-se a importância de pesquisas que correlacionam esses SE com os atributos de solos orgânicos, em

vários ambientes.

Os solos com horizontes orgânicos na parte alta do PNI, embora frágeis e em menor extensão, são extremamente importantes na proteção ambiental e dos recursos solo, água e biodiversidade. Sua degradação terá consequências graves sobre as populações humanas, inclusive com aumento do risco de desastres que, frequentemente, afetam de forma desproporcional as populações mais vulneráveis, colocando vidas em risco. Portanto, deve-se destacar a importância da conservação desses solos, de práticas de manejo sustentáveis e de seu monitoramento. Essas práticas são fundamentais para garantir um futuro justo, economicamente viável e saudável para todos, inclusive os demais seres vivos no planeta Terra.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, W. A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, v. 24, n. 1, p. 10-17, 1973. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>.
- ALLEN, B.V.R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R.; CHURCH, J.A.; CLARKE, L.; DAHE, Q.; DASGUPTA, P.; DUBASH, N.K. Climate change 2014. Synthesis report. Environmental Policy Collection, v. 27, p. 408, 2014.
- ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- ANDRADE, F. H. N.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ALMEIDA, B. G.; FILHO, J. A. C. A.; MANTOVANELLI, B. C.; FILHO, J. C. A. Atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos tabuleiros costeiros de Pernambuco. *Irriga*, v. 25, p. 69-86, 2020. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2020v25n1p69-86>.
- ANDRIESSE, J.P. Nature and management of tropical peat soils. Rome: FAO, 1988. 59p. ISBN: 92-5-102657-2.
- BARRETO, C. G.; CAMPOS, J. B.; ROBERTO, D. M.; ROBERTO, D. M.; SCHWARZSTEIN, N. T.; ALVES, G. S. G.; COELHO, W. Plano de Manejo: Parque Nacional do Itatiaia. Encarte 3. Relatório Técnico Instituto Chico Mendes, 2013. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/pmparna_itatiaia_enc1.pdf>.
- BEAULIEU, E.; GODDÉRIS, Y.; DONNADIEU, Y.; LABAT, D.; ROELANDT, C. High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change. *Nature Climate Change*, v. 2, n. 5, p. 346–349, 2012. <https://doi.org/10.1038/nclimate1419>.
- BEER, F.; VILLEGAS, L.; NUUTINEN, M.; WICHTMANN, W.; MILLIKEN, K. PEATLANDS. In: Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices: Volume 2: Hot Spots and bright spots of soil organic carbon, 2021. <https://doi.org/10.4060/cb6378en>.
- BENAVIDES, J. C.; VITT, D. H. Response curves and the environmental limits for peat-forming species in the northern Andes. *Plant Ecology*, v. 215, p. 937-952, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0346-7>.
- BENITES, V. M. Caracterização de solos e das substâncias húmicas em complexo rupestre de altitude (Tese). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- BENITES, V. M. Caracterização química e espectroscópica da matéria orgânica e suas relações com a gênese de solos da Serra do Brigadeiro, Zona da Mata Mineira (Mestrado). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- BENITES, V. M.; KER, J. K.; MENDONÇA, E. S. Fracionamento quantitativo de substâncias húmicas como auxiliar na identificação de diferentes solos da região sul do Brasil – VI RCC. VI RCC – Reunião de correlação, classificação e aplicação de levantamentos de solos RS/SC/PR. In: Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Embrapa, IAC, 2000.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E.; LIMA, C. X. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos

- brasileiros. Embrapa Arroz e Feijão - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2006. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/881919>>.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, v. 139, n. 1-2, p. 90-97, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 7p., 2003. ISSN 1517-5685.
- BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVOTNY, E. H.; REIS, E. L.; KER, J. C. Properties of black soil humic acids from high altitude rocky complexes in Brazil. *Geoderma*, v. 127, p. 104-113, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.020>.
- BENITES, V. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; SANTOS, H. G. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 30, p. 569-577, 2007.
- BERNACCHI, C. J.; SINGSAAS, E. L.; PIMENTEL, C.; PORTIS, A. R. JR.; LONG, S. P. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, v. 24, n. 2, p. 253-259, 2001. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2001.00668.x>.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 3, p. 743-749, 1998. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200030029x>.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. D. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. D. S.; MENEZES, M. D. D.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. D. Bulk density prediction for Histosols and soil horizons with high organic matter content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160158>.
- BOSCHI, R. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C.; DA SILVA SOUZA, G. P.; CIDIN, A. C. M.; ASSAD, E. D. Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, v. 2, n. 1, p. 8-16, 2015. ISSN 2359-6643.
- BRAGAZZA, L.; BUTTLER, A.; SIEGENTHALER, A.; MITCHELL, E. A. Plant litter decomposition and nutrient release in peatlands. *Geophysical Monograph Series*, v. 184, p. 99-110, 2009.
- CAMINHOS GEOLÓGIOS. Mapa geológico simplificado do estado do Rio de Janeiro. Projeto Caminhos Geológicos, 2013. Disponível em: <<http://www.caminhosgeologicos.rj.gov.br/sitept/home/>>. Acesso em: setembro de 2020.
- CANTO, A.C.B. do; FONTANA, A.; CESÁRIO, F.; de FIGUEIREDO, L.G.E.; CHEAUZU, H. Organossolos e outros solos com horizontes orgânicos no Brasil: abrangência e área manejada entre os anos de 1994 a 2020. 2020.
- CARVALHO JUNIOR, W. D.; CALDERANO FILHO, B.; CHAGAS, C. D. S.; BHERING,

- S. B.; PEREIRA, N. R.; PINHEIRO, H. S. K. Regressão linear múltipla e modelo Random Forest para estimar a densidade do solo em áreas montanhosas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1428-1437, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900041>.
- CARVALHO JUNIOR, W. D.; CHAGAS, C. D. S.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B. Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos de áreas tropicais montanhosas. In: Congresso Brasileiro De Ciências Do Solo, 34., 2013, Florianópolis. Anais. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/966643>>.
- CARVALHO, F. DE; GODOY, E. L.; LISBOA, F. J.; MOREIRA, F. M. D. S.; SOUZA, F. A. DE; BERBARA, R. L. L.; FERNANDES, G. W. Relationship between physical and chemical soil attributes and plant species diversity in tropical mountain ecosystems from Brazil. *Journal of Mountain Science*, v. 11, n. 4, p. 875-883, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2792-4>.
- CHOROVER, J.; AMISTADI, M. K. Reaction of forest floor organic matter at goethite, birnessite and smectite surfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, London, v. 65, n. 1, p. 95-109, jan. 2001.
- CHOW, A.T.; TANJI, K.K.; GAO, S.; DAHLGREN, R.A. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 38, p. 477–488, 2006.
- CINGOLANI, A. M.; CABIDO, M. R.; RENISON, D.; SOLÍS NEFFA, V. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *Journal of Vegetation Science*, v. 14, n. 2, p. 223-232, 2003.
- COSTA, E. M. Soil characterization and evaluation of environments vulnerability in Itatiaia National Park, Brazil. 121p. Thesis (Doctor in Agronomy-Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.
- COSTA, E. M.; DOS ANJOS, L. H. C.; PINHEIRO, H. S. K.; GELSLEICHTER, Y. A.; MARCONDES, R. A. T. Spatial Bayesian belief networks: a participatory approach for mapping environmental vulnerability at the Itatiaia National Park, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 79, n. 14, p. 1-13, 2020.
- CRAWFORD, T. W. Plant nutrition: interactions of mineral and organic substances. In: *Handbook of Plant and Crop Physiology*. CRC Press, 2021. p. 296-320.
- CULMAN, S.W.M.; FREEMAN, S.S.; SNAPP, S.S. Procedure for the determination of permanganate oxidizable carbon. *Kellogg Biological Station-Long Term Ecological Research Protocols*, Hickory Corners, MI, 2012.
- CURTIS, R. O.; POST, B. W. Estimating bulk density from organic-matter content in some Vermont forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 28, n. 2, p. 285-286, 1964. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800020044x>.
- DE CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E), 2015.
- DICK, D.; NOVOTNY, E.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V.; ALLEONI, L. Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos e aplicações. Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 697-763, 2019.
- DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da Matéria orgânica do

Solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). Química e Mineralogia do solo: Parte II – Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 428-436, 2009.

DJUKIC, I.; KEPFER-ROJAS, S.; SCHMIDT, I. K.; STEVENS, C. J.; AUGUSTAITIS, A.; BAKKER, M. R.; BRANDEIS, T.; DEROME, J.; DOMISCH, T.; DRAKE, J. A.; FORSIUS, M.; HANSEN, K.; HOMOLAK, M.; KAZANCI, C.; KRAMPER-KERNER, S.; KUMAR, P.; LUKAC, M.; MAKIPALKO, A.; MAZZONCINI, M.; OULEHLE, F.; PACHAURI, R. K.; PNUELAS, J.; REYNOLDS, B.; ROTTIERS, E.; SCHAFFERS, A. P.; SMITH, A. R.; STARLINGER, F.; STARR, M.; SUCHANEK, T. H.; TOTH, J. A.; VARA-REVELLES, D.; VERSTRAETEN, G.; WRIGHT, R. F.; ZIMKA, J.; HOLMES, R. T. Early stage litter decomposition across biomes. *Science of the Total Environment*, v. 628-629, p. 1369-1394, 2018. 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. 261-266, 2008.

FALKENBERG, D. de B. Matinhas nebulares e vegetação rupícola dos Aparados da Serra Geral (SC/RS), sul do Brasil. 558p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Campinas, SP, 2003.

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

FAO. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome, 2020.

FONTANA, A. Fracionamento da matéria orgânica e caracterização dos ácidos húmicos e sua utilização no sistema brasileiro de classificação de solos. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

FONTANA, A.; BENITES, V.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.D. Substâncias húmicas como suporte à classificação de solos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2073-2080, 2008b. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500028>.

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, p. 1-21, 2008a. <https://doi.org/10.1080/00103620801925323>.

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.D.; BENITES, V.D.M. Classificação de horizontes diagnósticos em níveis hierárquicos inferiores com base nas frações húmicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 313-324, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200003>.

GALLARDO-CRUZ, J. A.; PÉREZ-GARCÍA, E. A.; MEAVE, J. A. β -Diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscape. *Landscape Ecology*, v. 24, n. 4, p. 473-482, 2009.

GALVÃO, F. A.; VAHL, L. C. Calibração do método SMP para solos orgânicos. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 2, n. 2, p. 121-131, 1996.

GARCIA, M. J. Potencialidade e aplicação de turfas. *R. Univ. Guarulhos*, v. 1, p. 16-30, 1996.

GARCIA-PAUSAS, J.; CASALS, P.; ROMANYÀ, J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 36, p. 989-997, 2004.

GEITNER, C.; FREPPAZ, M.; LESJAK, J.; SCHABER, E.; STANCHI, S.; D'AMICO, M.; VRSCAJ, B. Soil Ecosystem Services in the Alps - An introduction for decision-makers. Agricultural Institute of Slovenia, 78p., 2019.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic-matter in soils by solid-state ^{13}C CP/MAS NMR-Spectroscopy and scanning electron-microscopy. Australian Journal of Soil Research, Melbourne, v. 32, n. 2, p. 285-309, jan. 1994.

GOMES, A. D. S.; FERREIRA, A. C. D. S.; PINHEIRO, É. F. M.; MENEZES, M. D. D.; CEDDIA, M. B. The use of Pedotransfer functions and the estimation of carbon stock in the Central Amazon region. Scientia Agricola, v. 74, p. 450-460, 2017. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0310>.

GOMES, J. B. V.; RESENDE, M.; REZENDE, S. B.; MENDONÇA, E. S. Solos de três áreas de restinga. II Dinâmica de substâncias húmicas, ferro e alumínio. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, n. 11, 1998. ISSN: 1678-3921.

GREVE, P.; ORLOWSKY, B.; MUELLER, B.; SHEFFIELD, J.; REICHSTEIN, M.; SENEVIRATNE, S. I. Corrigendum: global assessment of trends in wetting and drying over land. Nature Geoscience, v. 7, p. 848, 2014.

GRIGGS, D. J.; NOGUER, M. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Weather, v. 57, p. 267-269, 2010.

GRØNLUND, A.; HAUGE, A.; HOVDE, A.; RASSE, D. P. Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 81, p. 157-167, 2008.

HANKE, D.; DICK, D. P. Estoque de carbono e mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo: uma revisão. Revista Científica Agropampa, v. 2, n. 2, p. 171-190, 2019.

HEUSCHER, S. A.; BRANDT, C. C.; JARDINE, P. M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. Soil Science Society of America Journal, v. 69, n. 1, p. 51-56, 2005. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051a>.

HOCK, C.; RASUL, G.; ADLER, C.; CÁCERES, B.; GRUBER, S.; HIRABAYASHI, Y.; JACKSON, M.; KÄÄB, A.; KANG, S.; KUTUZOV, S.; MILNER, A.; MOLAU, U.; MORIN, S.; ORLOVE, B.; STELTZER, H.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WIENER, G. High mountain areas. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WIENER, G. (Eds.). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. p. 131-202, 2019. HONEYSETT, J. L.; RATKOWSKY, D. A. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. Journal of Soil Science, v. 40, n. 2, p. 299-308, 1989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01275.x>.

HOLLIS, J. M.; HANNAM, J.; BELLAMY, P. H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. European Journal of Soil Science, v. 63, p. 96-109, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x>.

HONEYSETT, J. L.; RATKOWSKY, D. A. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. Journal of Soil Science, v. 40, p. 299-308, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01275.x>.

- HRIBLJAN, J. A.; SUÁREZ, E.; HECKMAN, K. A.; LILLESKOV, E. A.; CHIMNER, R. A. Peatland carbon stocks and accumulation rates in the Ecuadorian páramo. *Wetlands Ecology and Management*, v. 24, n. 2, p. 113-127, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9482-2>.
- HURISSO, T. T.; CULMAN, S. W.; ZONE, P.; SHARMA, S. Absolute values and precision of emerging soil health indicators as affected by soil sieve size. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 49, n. 15, p. 1934-1942, 2018.
- IBAMA. Brasil: Parques Nacionais. São Paulo: Empresa das Artes, Brasília: Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1997.
- IPBES. INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. Sobre o IPBES. Disponível em: <https://www.ipbes.net/>. Acesso em: 26 jan. 2025.
- IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden e C.E. Hanson (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri e L.A. Meyer (Eds.). Geneva: IPCC, 151p., 2014.
- JEFFREY, D. W. A Note on Use of Ignition Loss as A Means for Approximate Estimation of Soil Bulk Density. *Journal of Ecology*, v. 58, p. 297, 1970. <https://doi.org/10.2307/2258183>.
- JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, v. 123, n. 5, p. 298-305, 1977.
- JENNY, H. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Courier Corporation, 1994.
- JOOSTEN, H.; COUWENBERG, J. Peatlands and carbon. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Global Environment Centre, International Wageningen, p. 99-117, 2008.
- KÄMPF, N.; CURRI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J. C.; CURRI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). Pedologia: fundamentos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302, 2012.
- KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G.; MEINK, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DANG, Y. P.; HAYMAN, P.; DALGLIESH, N.; CLEMESHA, R.; STONE, R.; SILBURN, M.; MOORE, A.; PEARSON, L.; MURRAY, L.; FREEBAIRN, D. M.; SMITH, C. J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, v. 18, n. 3-4, p. 267-288, 2003.
- KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, v. 154, n. 3-4, p. 398-406, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.013>.
- KEUSKAMP, J. A.; DINGEMANS, B. J. J.; LEHTINEN, T.; SARNEEL, J. M.; HEFTING, M. M. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 4, p. 1070-1075, 2013.
- KLEBER, M. What is recalcitrant soil organic matter? *Environmental Chemistry*, v. 7, n. 4, p.

320-332, 2010.

KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. A conceptual model of organo-mineral interaction in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry*, Dordrecht, v. 85, n. 1, p. 9-24, jun. 2007.

KÖRNER, C.; BASLER, D. Phenology under global warming. *Science*, v. 327, n. 5972, p. 1461-1462, 2010.

KOVEN, C. D.; HUGELIUS, G.; LAWRENCE, D. M.; WIEDER, W. R. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nature Climate Change*, v. 7, 2017.

KUHRY, P.; VITT, D. H. Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. *Ecology*, v. 77, n. 1, p. 271-275, 1996.

LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T. A. A model of N₂O evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.*, v. 97, p. 9759-9776, 1992.

LIANG, Y.; GOLLANY, H. T.; RICKMAN, R. W.; ALBRECHT, S. L.; FOLLETT, R. F.; WILHELM, W. W.; NOVAK, J. M.; DOUGLAS Jr., C. L. Simulating soil organic matter with CQESTR (v. 2.0): Model description and validation against long-term experiments across North America. *Ecological Modelling*, v. 220, p. 568-581, 2009.

LIMA, H. N. Gênese, química e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, v. 8, n. 3, p. 315-323, 1994. <https://doi.org/10.2307/2389824>.

LONG, S. P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell & Environment*, v. 14, n. 8, p. 729-739, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01439.x>.

LOOBY, C. I.; MALTZ, M. R.; TRESEDER, K. K. Belowground responses to elevation in a changing cloud forest. *Ecology and Evolution*, v. 6, n. 7, p. 1996-2009, 2016. <https://doi.org/10.1002/ece3.2025>.

MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H.; RITTL, T. F.; HAYES, M. H. H. B. Soil organic matter: chemical and physical characteristics and analytical methods - a review. *Current Organic Chemistry*, Hilversum, v. 17, p. 19-24, dez. 2013.

MAKOVNÍKOVÁ, J.; ŠIRÁŇ, M.; HOУŠKOVÁ, B.; PÁLKA, B.; JONES, A. Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study-Slovakian agricultural soils. *International Agrophysics*, v. 31, n. 4, p. 491, 2017. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0079>.

MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 55, n. 2, p. 476-481, 1991. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020030x>.

MEDEIROS, A. dos S. Influência do uso da terra sobre o comportamento da matéria orgânica do solo e o estoque de carbono, Parque Nacional do Itatiaia – RJ. 242 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

MELO, V. F. Solos e indicadores de uso agrícola em Roraima: área indígena Maloca Flechal e

- de colonização do Apiau. 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. Matéria Orgânica do solo: Métodos de Análises. 2. ed. Viçosa, Minas Gerais: UFV, 2017.
- MIKUTTA, R.; MIKUTTA, C.; GUGGENBERGER, G. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, London, v. 71, n. 10, p. 2569-2590, mai. 2007.
- OADES, J. M.; WATERS, S. G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 815-828, jan. 1991.
- OFIPCC, W. G. I. Climate change; the physical science basis. Contribution of Working 43, p. 866-871, 2013.
- PÁDUA, E. J. D.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 725-736, 2015.
- PARTON, W. J.; SCHIMEL, D. S.; COLE, C. V.; OJIMA, D. S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, v. 51, n. 5, p. 1173-1179, 1987.
- PAUSTIAN, K.; LARSON, E.; KENT, J.; MARX, E.; SWAN, A. Soil Carbon Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, v. 1, p. 8, 2019.
- PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; VALLADARES, G. S. Organossolos: Ocorrência, gênese, classificação, alterações pelo uso agrícola e manejo. In: VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M.; CARDOSO, E. J. (Org.). Tópicos em Ciência do Solo. 4. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 4, p. 233-276, 2005. ISSN: 1519-3934.
- 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. 25-36, 2013.
- PICCOLO, A.; SPACCINI, R.; DROSOS, M.; VINCI, G.; COZZOLINO, V. The Molecular Composition of Humus. Carbon: Recalcitrance and Reactivity in Soils. *The Future of Soil Carbon*, p. 87-124, 2018. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811687-6.00004-3>.
- POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. Granitic and gneissic outcrops (inselbergs) as centers of diversity for desiccation-tolerant vascular plants. *Plant Ecology*, v. 151, p. 19-28, 2000.
- PREScott, C. E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, v. 101, p. 133-149, 2010.
- RAMCHARAN, A.; HENGL, T.; BEAUDETTE, D.; WILLS, S. A soil bulk density pedotransfer function based on machine learning: A case study with the NCSS soil characterization database. *Soil Science Society of America Journal*, v. 81, n. 6, p. 1279-1287, 2017. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0421>.
- REIS, A. M. H. D.; TEIXEIRA, W. G.; FONTANA, A.; BARROS, A. H. C.; VICTORIA, D. D. C.; VASQUES, G. M.; SAMUEL-ROSA, A.; OTTONI, M. V.; MONTEIRO, J. E. B. D. A. Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian soils. *Scientia Agricola*, v. 81, 2024.
- RIBEIRO, M.; BARROS, M. DE F.; FREIRE, M. B. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V.; ALLEONI, L. Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos e aplicações.

- Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1145-1180, 2019.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia, v. 8, p. 63-74, 1994.
- SAFFORD, H. D. Brazilian Paramos II. Macro - and Mesoclimate of the Campos De Altitude and Affinities with High Mountain Climates of the Tropical Andes and Costa Rica. Journal of Biogeography, v. 26, n. 4, p. 713-737, 1999.
- SAFFORD, H. D. Brazilian Páramos IV. Pytogeography of the Campos De Altitude. Journal of Biogeography, v. 34, n. 4, p. 1701-1722, 2007.
- SAFFORD, H. D.; MARTINELLI, G. Southeast Brazil. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.). Inselbergs. Heidelberg: Ecological Studies, v. 146. Springer-Verlag, p. 339-389, 2000.
- SAINI, G. R. Organic matter as a measure of bulk density of soil. Nature, v. 210, p. 1295-1296, 1966. <https://doi.org/10.1038/2101295a0>.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; FILHO, J. C. de A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SCHAEFER, C. E. R.; KER, J. C.; GILKES, R. J.; CAMPOS, J. C.; COSTA, L. M. D.; SAADI, A. Pedogenesis on the uplands of the Diamantina Plateau, Minas Gerais, Brazil: a chemical and micropedological study. Geoderma, v. 107, p. 243-269, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00151-3).
- SCHAETZL, R.; ANDERSON, S. Soils - Genesis and Geomorphology. Cambridge: Cambridge University Press, 817p., 2005.
- SCHEER, M. B.; CURCIO, G. R.; RODERJAN, C. V. Funcionalidades ambientais de solos altomontanos na Serra da Igreja, Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, n. 4, p. 1013-1026, 2011.
- SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. Science, v. 275, n. 5299, p. 502-509, 1997. <https://doi.org/10.1126/science.275.5299.502>.
- SHEIKH, M. A.; KUMAR, M.; BUSSMANN, R. W. Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. Carbon Balance and Management, v. 4, n. 1, p. 6, 2009. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-6>.
- SILVA NETO, E. C.; ANJOS, L. H. C.; CALEGARI, M. R.; HORÁK-TERRA, I.; OLIVEIRA, F. S.; VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G. Organic soils in Southeastern Brazilian highlands: formation and relations to vegetation history. Catena, v. 237, p. 107786, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107786>.
- SILVA NETO, E. C.; COELHO-JUNIOR, M. G.; HORÁK-TERRA, I.; GONÇALVES, T. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Organic Soils: Formation, Classification and Environmental Changes Records in the Highlands of Southeastern Brazil. Sustainability, v. 15, n. 4, p. 3416, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043416>.
- SILVA NETO, E. C. D.; SANTOS, J. J. S. D.; PEREIRA, M. G.; MARANHÃO, D. D. C.;

- BARROS, F. D. C.; ANJOS, L. H. C. D. Paleoenvironmental characterization of a high-mountain environment in the Atlantic Forest in southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170415>.
- SILVA, A. C.; HORÁK, I.; VIDAL-TORRADO, P.; CORTIZAS, A. M.; RACEDO, J. R.; CAMPOS, J. R. D. R. Turfeiras da Serra do Espinhaço Meridional-MG: II-Influência da drenagem na composição elementar e substâncias húmicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1399-1408, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500031>.
- SILVIUS, M. J.; ONEKA, M.; VERHAGEN, A. Wetlands: Lifeline for people at the edge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, v. 25, n. 7, p. 645-652, 2000.
- SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; CHAGAS, A. C.; BRANDÃO, P. C. Chemistry, mineralogy and micropedology of highland soils on crystalline rocks of Serra da Mantiqueira, southeastern Brazil. *Geoderma*, v. 125, p. 187-201, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.013>.
- SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7-31, set. 2004.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S. M.; SA, M. J. C. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. *Agronomie, Versailles*, v. 22, n. 7-8, p. 755-775, nov./dez. 2002.
- SOARES, P. F. C.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PESSENCIA, L. C. R. Histosols in an Upper Montane Environment in the Itatiaia Plateau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, p. 1-13, 2016.
- SOETHE, N.; LEHMANN, J.; ENGELS, C. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Tropical Ecology*, p. 397-406, 2008. <https://doi.org/10.1017/S026646740800504X>.
- SOLLINS, P., HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 74, 65-105, 1996.
- SPEHN, E. M.; LIBERMAN, M.; KÖRNER, C. Land use change and mountain biodiversity. CRC Press, Boca Raton, 2006.
- SPOSITO, G. The chemistry of soils. New York, Oxford University. 277p, 1989.
- STANCHI, S.; D'AMICO, M. E., PINTALDI, E., COLOMBO, N., ROMEO, R., & FREPPAZ, M. Mountain soils. In Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices: Volume 2: Hot Spots and bright spots of soil organic carbono, 2021. <https://doi.org/10.4060/cb6378en>.
- STEVENSON, F. J. Húmus chemistry: genesis, composition and reaction. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- SUUSTER, E., RITZ, C., ROOSTALU, H., REINTAM, E., KÖLLI, R., & ASTOVER, A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma*, 163(1-2), 74-82, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.005>.
- SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L., (Ed). Methods of soil analysis: part 3. Madison: America Society of Agronomy, p.1011-1020, 1996.

- SZARZYNSKI, J. Xeric islands: environmental conditions on inselbergs. In: *Inselbergs*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. p. 37-48. ISBN 978-3-642-64120-6.
- TAMMINEN, P.; STARR, M. Bulk density of forested mineral soils. Helsinki: The Finnish Society of Forest Science and The Finnish Forest Research Institute, 1994.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, v. 163, p. 190-202, 1998.
- TURETTA, A. P. D.; DE CASTRO, S. S.; POLIDORO, J. C. Solos, sustentabilidade e provisão de serviços ecossistêmicos. Embrapa Solos – Artigo em periódico indexado (ALICE), 2017.
- UNEP. United Nations Environment Programme. UNEP: 50 years of Environmental Milestones. Disponível em: <https://www.unep.org/environmental-moments-unep50-timeline>. Acesso em: 26 jan. 2025.
- VALLADARES, G. S. Caracterização de Organossolos, auxílio à sua classificação. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2003. 129 p. (Tese de Doutorado).
- VALLADARES, G. S.; BENITES, V. D. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D.; EBELING, A. G. Proposta para classificação de Organossolos em níveis inferiores com base nas frações húmicas. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2003. 35 p. ISSN 1806-3322.
- VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; SOARES DE MELLO, J. C. C.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D.; EBELING, A. G.; BENITES, V. D. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinários no estudo de Organossolos e solos afins. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 285-296, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100027>.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D.; EBELING, A. G. Caracterização de solos brasileiros com elevados teores de material orgânico. Magistra, v. 20, p. 95-104, 2008a. ISSN 0102-5333.
- 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103620701220759>.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; BENITES, V. D. M.; ANJOS, L. H. C. D.; EBELING, A. G.; GUARESCHI, R. F. Carbon and nitrogen stocks and humic fractions in Brazilian Organosols. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20151317>.
- VON-LUTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. European Journal of Soil Science, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.
- WATTEL-KOEKKOEK, E. J. W.; VAN GENUCHTEN, P. P. L.; BUURMAN, P.; VAN LAGEN, B. Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. Geoderma, v. 99, p. 27-49, 2001.
- WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for lab and field use. American Journal of Alternative Agriculture, v. 18, p. 3-17, 2003. Disponível em:

<https://doi.org/10.1079/AJAA200228>.

WEISSERT, L. F.; DISNEY, M. Carbon storage in peatlands: a case study on the Isle of Man. *Geoderma*, v. 204, p. 111-119, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.016>.

YANG, F.; TANG, C.; ANTONIETTI, M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chemical Society Reviews*, v. 50, n. 10, p. 6221-6239, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0CS01363C>.