

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Indicadores pedológicos na dinâmica do verdor no semiárido brasileiro**

Tatiana Custódio de Oliveira  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**TATIANA CUSTÓDIO DE OLIVEIRA**

**Indicadores pedológicos na dinâmica do verdor no semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Jose J. L. Leal de Souza

Coorientador: Elpidio I. Fernandes Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48i  
2025  
Oliveira, Tatiana Custódio de, 1991-  
Indicadores pedológicos na dinâmica do verdor no  
semiárido brasileiro / Tatiana Custódio de Oliveira. – Viçosa,  
MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (51 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: José João Lelis Leal de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2025.

Referências bibliográficas: f. 39-48.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.543>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Química do solo - Brasil, Nordeste - Efeito da  
desertificação. 2. Física do solo - Brasil, Nordeste - Efeito da  
desertificação. 3. Ecologia do solo - Brasil, Nordeste - Efeito da  
desertificação. I. Souza, José João Lelis Leal de, 1986-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.  
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.  
III. Título.

CDD 22. ed. 631.417

**TATIANA CUSTÓDIO DE OLIVEIRA**

**Indicadores pedológicos na dinâmica do verdor no semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de maio de 2025.

Assentimento:

---

Tatiana Custódio de Oliveira  
Autora

---

Jose Joao Lelis Leal de Souza  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 22/08/2025 às 14:38:43 e pelo orientador em 22/08/2025 às 15:10:24. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **ABV4.YPZ6.GHI1** e clique no botão 'Validar documento'.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ser Àquele quem me sustenta e fortalece a cada dia e em cada etapa da minha vida.

Agradeço ao meu marido, Diêgo César, por me apoiar e ser o meu porto seguro, sempre me lembrando de que “desistir não é uma opção” e que em tudo há um propósito.

Também agradeço aos meus pais, Alúizio e Conceição, que me proporcionaram toda a base para chegar onde estou. Assim, também agradeço ao meu irmão, Fábio Alex Custódio, por toda amizade e companheirismo.

Aos responsáveis pelo funcionamento e dedicação ao trabalho nos laboratórios, nas salas de aula e trabalhos de campo, técnicos e professores, em especial ao professor José João (JJ) (UFV), professor Elpídio (UFV) e professor Bartolomeu Israel de Souza (ou prof. Bartô) da UFPB.

Agradeço também a Luís Flávio Pereira e Gustavo Vieira Veloso do LABGEO/UFV por suas contribuições e auxílio nas técnicas de *machine learning* e R.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Muito obrigada a todos!

[...]

*Nada vai me impedir e eu irei até o fim  
Se o mar não se abrir eu ando sobre as águas  
Tua palavra viva está e o Senhor é vencedor  
Quem pode se comparar? Tu és invencível  
Não tenho medo a minha fé firmada está  
Andando sobre o alto mar o barco ficará para trás  
Pois tua palavra sustenta os meus pés no mar  
A voz que me chama a andar é a mesma que acalma o mar  
Ele me chama para andar sobre as águas  
Ele me chama para andar sobre a tua palavra (Sobre as águas - Dunamis Music)*

## RESUMO

OLIVEIRA, Tatiana Custódio de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2025. **Indicadores pedológicos na dinâmica do verdor no semiárido brasileiro.** Orientador: Jose Joao Lelis Leal de Souza. Coorientador: Elpidio Inacio Fernandes Filho.

Áreas em processos de desertificação estão se expandindo em todo o mundo, e as regiões áridas e semiáridas como as do Nordeste brasileiro são as mais suscetíveis a este tipo de degradação devido a diferentes fatores, sejam eles antrópicos e/ou naturais. O presente estudo teve como objetivo compreender os efeitos da desertificação nas propriedades físico-químicas do solo, bem como identificar as variáveis mais importantes para prever sua suscetibilidade à desertificação. Para isso, utilizou-se um banco de dados de perfis de solo coletados nos últimos cinco anos. Ao todo foram selecionados 92 perfis de solos da região do Cariri Paraibano e Seridó Potiguar, que são as porções mais secas da Caatinga e com maior concentração de municípios suscetíveis à desertificação. A partir de uma série temporal entre janeiro de 2001 a dezembro de 2023, e por meio de imagens da coleção MODIS/061/MOD13Q1 foram identificados os estados iniciais da vegetação (alto ou baixo verdor) e três tendências (ganho de verdor, perda de verdor ou estável) totalizando seis classes: degradado com perda de verdor, degradado com ganho de verdor, degradado estável, conservada com perda de verdor, conservada com ganho de verdor e conservada estável. Foi identificado que as áreas conservadas não possuem maior fertilidade natural, diferentemente do que esperaríamos para aquelas que não passam por um processo de intemperismo intenso. O mesmo foi identificado para as áreas degradadas com ganho de verdor que também não possuem fertilidade natural acima de 50% e apresentam solos moderadamente ácidos.

Palavras-chave: perda de verdor; ganho de verdor; desertificação; indicadores pedológicos; semiárido brasileiro

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Tatiana Custódio de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2025. **Pedological indicators in the dynamics of greenness in the Brazilian semiarid region.** Adviser: Jose Joao Leis Leal de Souza. Co-adviser: Elpidio Inacio Fernandes Filho.

Areas in desertification processes are expanding around the world, and arid and semi-arid regions such as those of the Brazilian Northeast are the most susceptible to this type of degradation due to different factors, whether anthropogenic and/or natural. The present study aimed to understand the effects of desertification on the physicochemical properties of the soil, as well as to identify the most important variables to predict its susceptibility to desertification. For this, a database of soil profiles collected in the last five years was used. In all, 92 soil profiles from the Cariri Paraibano and Seridó Potiguar region were selected, which are the driest portions of the Caatinga and with the highest concentration of municipalities susceptible to desertification. From a time series between January 2001 and December 2023, and through images from the MODIS/061/MOD13Q1 collection, the initial states of vegetation (high or low greening) and three trends (greening, browning or stable) were identified, totaling six classes: brown browning, brown greening, brown stable, green browning, greening and green stable. It was identified that green areas do not have greater natural fertility, unlike what we would expect for those that do not go through a process of intense weathering. The same was identified for brown greening areas that also do not have natural fertility above 50% and have moderately acidic soils.

Keywords: browning ; greening; desertification; pedological indicators; brazilian semiarid

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
2.1	Área de estudo.....	9
2.2	Seleção da amostragem.....	12
2.2.1	Uso da Análise de Componentes Principais – PCA.....	16
2.2.2	Matriz de correlação.....	17
2.2.3	Método de seleção Recursive Feature Elimination – RFE.....	17
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>18</b>
3.1	Redução de Dimensionalidade por Componentes Principais.....	21
3.2	Correlação observada entre as variáveis .....	25
3.3	Identificação das variáveis através do Machine Learning – seleção e ranking.....	29
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>39</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A desertificação é um fenômeno de degradação progressiva de áreas anteriormente produtivas em coexistência com as variações climatológicas (BRASIL, 2005; Souza & Travassos, 2011; Mirzabaev *et al.*, 2019; Lemos *et al.*, 2020). Pode-se afirmar que a desertificação ocorre quando o nível de degradação supera a capacidade de resiliência do ambiente. Nesse contexto, a resiliência refere-se à habilidade do ecossistema em absorver impactos negativos, como a escassez de água, aumento da temperatura e atividades agrícolas intensivas, e ainda assim conseguir manter funções ecológicas.

Áreas em processo de desertificação estão se expandindo em todos os continentes em função da interação entre mudanças climáticas e impactos humanos (CGEE, 2016; Mirzabaev *et al.*, 2019). Áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas são mais suscetíveis a desertificação devido a fatores naturais e/ou antrópicos. A irregularidade anual das chuvas e sazonalidade afetam a produção primária e sobrevivência das espécies vegetais mais sensíveis à seca (CGEE, 2016; Araujo *et al.*, 2024). O desmatamento para cultivo ou pastagem reduz a riqueza e abundância de comunidades vegetais e aumenta o número de indivíduos mortos durante os períodos de estiagem (Souza & Travassos, 2011; Perez-Marin *et al.*, 2012). Em estágio avançado de desertificação, a elevação da temperatura cria condições desfavoráveis para a germinação de novas sementes (Souza *et al.*, 2016; Lemos *et al.*, 2020), impedindo a regeneração das comunidades vegetais a médio e longo prazos.

O semiárido brasileiro é distribuído por onze estados sendo, Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (IBGE, 2022). Sua extensão é de 1.335.298 km<sup>2</sup>, abrangendo 1.477 municípios e aproximadamente 31 milhões de habitantes (IBGE, 2022; INSA, 2024). Parte do semiárido nordestino passa por longos períodos de estiagem e a precipitação pluviométrica ocorre de modo esparsa e irregular com média anual inferior a 800 mm (Souza *et al.*, 2015; INSA, 2019; IBGE, 2022). O déficit hídrico é agravado pela retirada da vegetação para atividades extrativistas e agropecuária desde o início da colonização europeia (BRASIL, 2005; Souza *et al.*, 2015; Vieira *et al.*, 2015; Souza, H. *et al.*, 2021; Araujo *et al.*, 2024) e tais alterações, causadas pela antropização favorecem o processo de desertificação (Bakhshandeh *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2024).

O semiárido apresenta áreas cristalinas, bacias sedimentares e áreas com recobrimento cristalino por sedimentos (Marques *et al.*, 2014). Em função da diversidade litológica e clima

semiárido, a região semiárida possui alta diversidade pedológica (IBGE, 2004; Souza, *et al.*, 2021). Os solos têm elevada afinidade com o material parental, são rasos e cascalhentos contrastando com outros mais profundos e argilosos, possuem teor de carbono orgânico inferior a 1% (Araújo Filho *et al.*, 2017; INSA, 2019) e são eutróficos, devido a baixa precipitação pluvial e alta taxa de evapotranspiração diminuindo a perda de nutrientes (INSA, 2019; Araújo Filho *et al.*, 2022). Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Planossolos e Vertissolos são as classes de solos predominantes no semiárido (Araújo Filho *et al.*, 2022).

Algumas mudanças nos padrões vegetais no ecossistema caracterizam o processo de degradação ambiental em áreas suscetíveis à desertificação e os indicadores vegetais como redução da cobertura vegetal com presença de solo exposto, espécies de plantas invasoras como *Prosopis juliflora* (algaroba) e menor produção de matéria orgânica são alguns sinais sensíveis que revelam as alterações desses ambientes (Imeson & Prinsen, 2004; Andrade *et al.*, 2010; Souza & Travassos, 2011; Souza *et al.*, 2011).

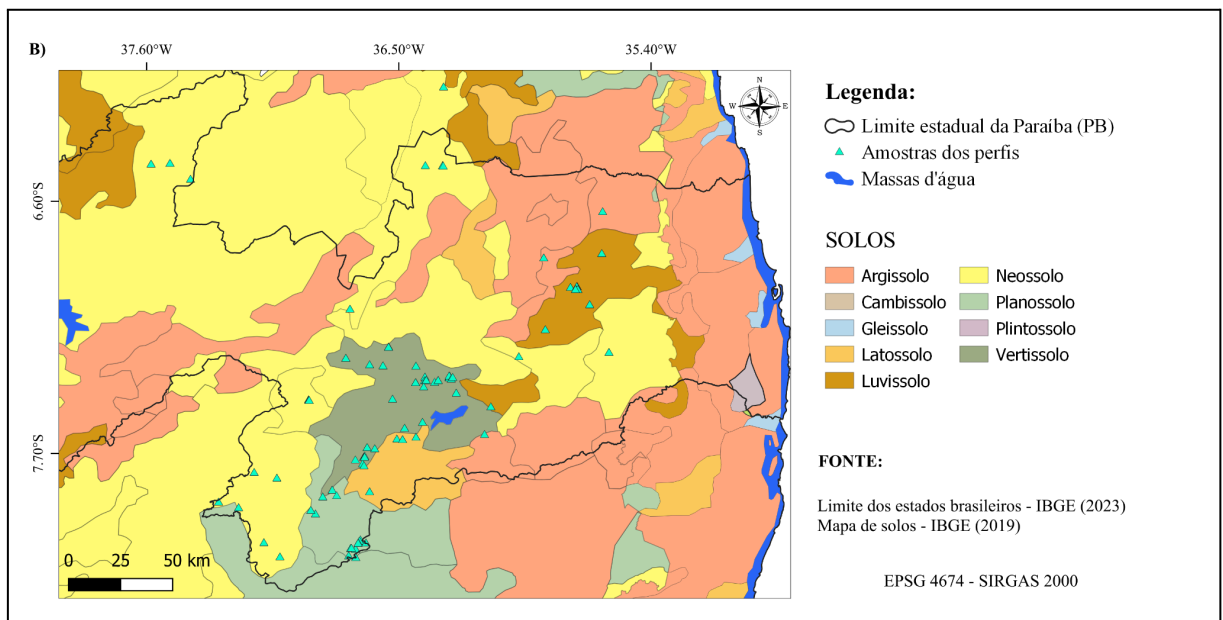
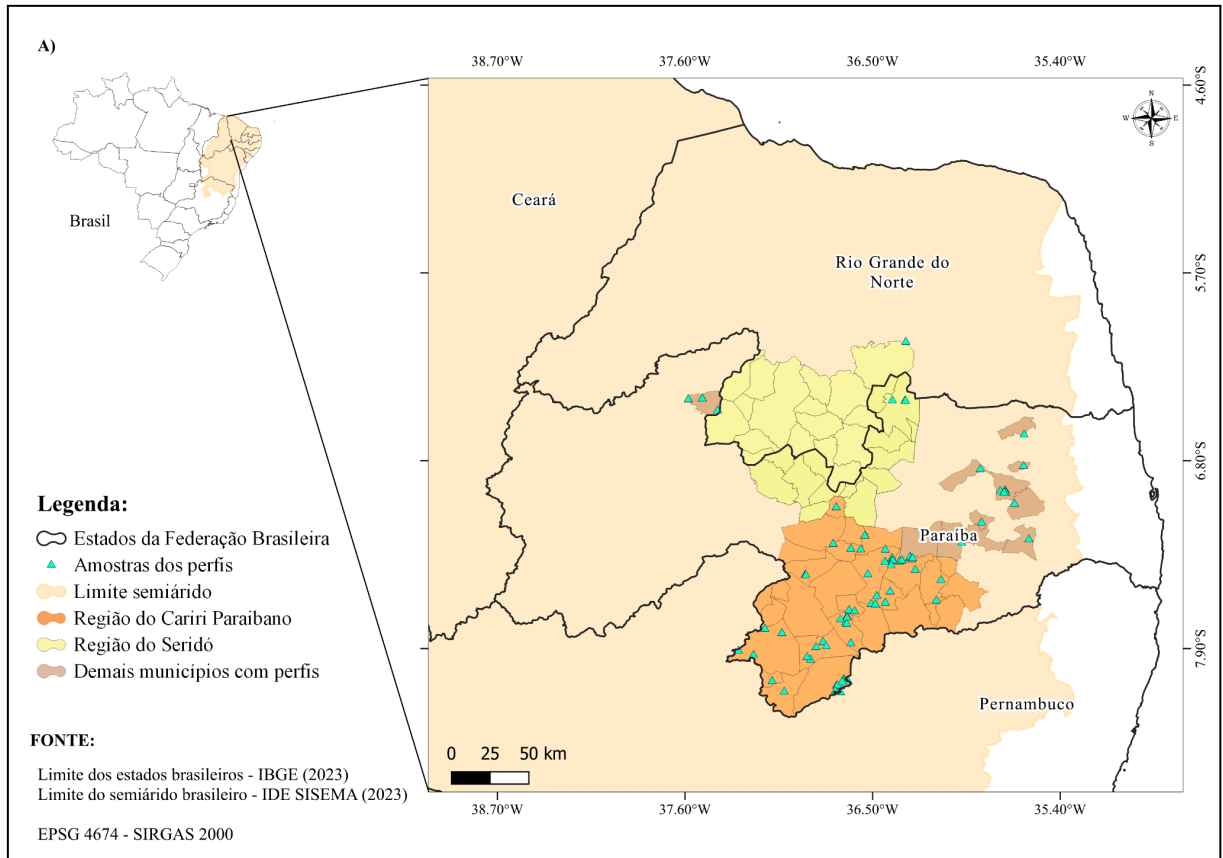
A partir da determinação dos estados iniciais da vegetação, degradadas ou conservadas, e determinação de suas tendências, se as áreas conservadas e degradadas apresentaram melhora ou piora gradual na condição da vegetação ao longo dos anos ou se a vegetação dessas áreas permaneceram estáveis com o passar do tempo, independente das variações climáticas como a chuva. A presente pesquisa teve como objetivo identificar as variáveis do solo que são mais importantes para prever a suscetibilidade à desertificação e então compreender os seus efeitos nas características dos solos tendo como possíveis resultados a verificação de aumento de verdor nas regiões do semiárido nordestino.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo**

Os perfis de solos analisados neste trabalho estão localizados nas regiões conhecidas como Cariri Paraibano, Seridó Paraibano e Potiguar, duas das regiões mais secas do semiárido e que concentram, o maior número de municípios suscetíveis à desertificação, sendo 208 de 223 no estado da Paraíba (Souza *et al.*, 2011) (Figura 1).

Figura 1- Mapa de localização (A) e de solos (B) da área de estudos



Fonte: Mapa de solos adaptado pela autora a partir do banco de dados do IBGE (2019).

O clima Bsh, presente na região e conhecido como clima semiárido quente, é caracterizado pela escassez de chuvas, irregularidade em sua distribuição e longas estações secas (Alvares *et al.*, 2013; Francisco *et al.*, 2017). A média da precipitação anual varia entre

300 e 700 mm. A evapotranspiração potencial é até quatro vezes superior à precipitação (Araujo *et al.*, 2024; Maciel *et al.*, 2024). A vegetação nativa é a Caatinga, marcada por algumas espécies adaptadas à escassez de água, como as bromeliáceas, cactáceas e de caráter xerófilo (Araújo Filho, 2017; Silva *et al.*, 2022).

A região em estudo apresenta uma litologia basicamente composta por áreas cristalinas, com presença de rochas proterozóicas e arqueadas supracrustais, granitóides/migmatitos, ortognaisses retrabalhados e embasamento gnáissico-migmatítico (BRASIL & CPRM, 2002). A região do Cariri Paraibano apresenta parte da superfície planáltica da Borborema, com aspecto aplainado (Alcantara *et al.*, 2016). O relevo plano a suave ondulado é interrompido pela presença de relevos residuais representados por serrotes, cristas isoladas e alguns *inselbergs* formados por erosão diferencial e atividade tectônica cretácea (Alcantara *et al.*, 2016).

O clima semiárido, com baixos índices pluviométricos e altas temperaturas, desempenham um papel significativo na formação dos solos da região. Estes solos são pouco intemperizados, com baixa presença de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), pouco profundos, apresentando uma baixa capacidade de armazenamento de água, alta saturação por bases e baixo teor de carbono orgânico (Souza *et al.*, 2009, 2015; Souza & Martins, 2012; Souza, H. *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2023).

Ao longo do tempo, processos como erosão e deposição de sedimentos têm moldado a paisagem e contribuído para a diversidade de tipos de solo. Nas colinas de relevo suave ondulado, ondulado e plano, predominam os Luvisolos e Neossolos Litólicos e Regolíticos. Vertissolos, Planossolos e Neossolos Flúvicos ocorrem em fundos de vale. As porções mais altas da paisagem abrigam Neossolos, Cambissolos e Organossolos em relevo declivoso e Argissolos em áreas de relevo plano (Souza *et al.*, 2009; Araújo Filho *et al.*, 2017).

O estado da Paraíba possui um histórico de ocupação antigo. Foi habitada por povos indígenas antes da chegada dos colonizadores portugueses em 1500, foi palco de importantes acontecimentos durante o período colonial, destacando-se a resistência dos índios potiguaras, os quais tinham a pesca e a agricultura como as principais atividades econômicas (PARAÍBA, 1997).

Os principais produtos que se destacavam eram o algodão e a criação de gado, atividades extrativistas e agropastoris as quais, devido à derrubada e queima da vegetação trazem danos principalmente para o solo se não forem praticadas de forma sustentável e com

manejo adequado (PARAÍBA, 1997; Souza *et al.*, 2009; Almeida-Filho & Carvalho, 2010; Souza, H. *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). Atividades como a mineração também fazem uso da madeira para transformar recursos como caulim em cal na fabricação de cerâmicas e argila, para fabricação de tijolos e telhas (Mello, 2011).

## 2.2 Seleção da amostragem

Dentre uma base de dados de perfis de solo coletados nos últimos cinco anos, 92 perfis de solo foram selecionados. Os dados dos perfis de solos apresentam vinte e duas variáveis contendo as propriedades espessura do horizonte superficial (cm), espessura total do perfil (cm), pH em água, carbono orgânico (%), argila (%) e silte (%) no horizonte superficial, areia grossa (%), areia fina (%), P<sub>rem</sub> (mg/L), soma de bases (SB) (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), saturação por alumínio (m) (%), saturação por sódio (Na<sub>sat</sub>) (%), saturação por base (V) (%), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), Capacidade de Troca Catiônica efetiva (CTC efetiva) (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), H+Al (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), Al<sup>3+</sup> (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), Mg<sup>2+</sup> (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), Ca<sup>2+</sup> (cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), K (mg/dm<sup>3</sup>), Na<sup>+</sup> (mg/dm<sup>3</sup>) e fósforo (mg/dm<sup>3</sup>). A média e o coeficiente de variação (em porcentagem) das informações referentes às propriedades foram calculadas para homogeneizar os perfis (Tabela 1).

Tabela 1- propriedades dos solos amostrados (média – coeficiente de variação)

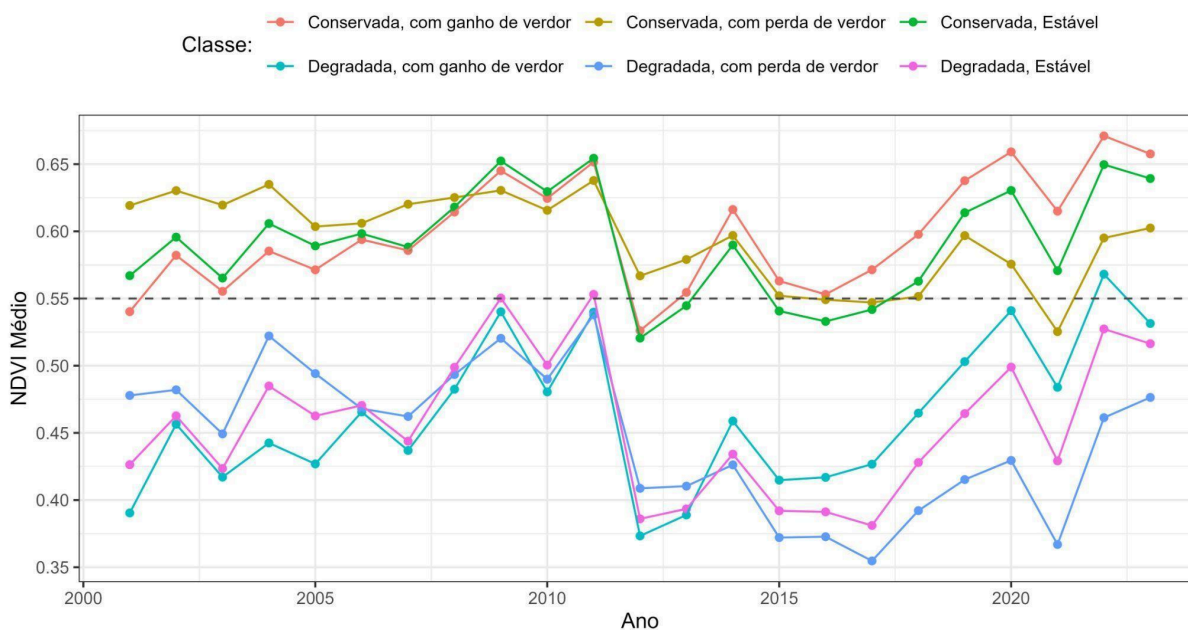
Classes (SiBCS)	NP*		Espessura a hz sup.	Espessura total do perfil	pH em água	C org.	Argila no hz sup.	Silte no hz sup.	AG	AF	P_rem	V	m	Na_sat	SB	CTC	CTC ef.	H+Al	Al <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K	Na <sup>+</sup>	P	
			-----cm-----					----- % -----			mg/L		----- % -----												
		Média - (CV %)																							
Argissolo	3	Média - (CV %)	21-6	115-42	6-31	3-45	35-45	13 - 65	39- 16	13-42	28-33	38- 133	46-88	0,1-173	5 - 151	13-19	7 - 102	7 - 83	2 - 51	2 - 113	3 - 160	218 - 173	3 - 173	121 - 172	
Cambissolo Háplico	9	Média - (CV %)	7-63	79-61	5,9-11,5	4-92	27-48	21-61	38-53	15-44	36-38	69-47	7-237	1-78	13 - 82	17-53	13- 79	4-93	0,2- 175	3-64	9-91	94- 130	12-138	33- 133	
Cambissolo Flúvico	4	Média - (CV %)	17-56	170-51	6,7-8,5	1-98	21-9	13-92	30-20	36-29	45-21	91-5	0 -	144	8- 47	11-43	10- 47	1-63	0-	2-54	7-50	140- 30	23-71	63- 104	
Gleissolo	4	Média - (CV %)	39-76	130-36	4,6-4,6	0,5-122	16-22	10-38	44-12	30-28	42-31	22- 34	51-25	1-160	1 - 47	5-52	2-40	4-59	1-55	0,3-27	1-73	40-61	3-147	2- 172	
Latossolo	6	Média - (CV %)	18 -24	140-17	4,4-12,3	5-40	40-40	9-50	41-24	10-39	20-32	11-86	61-46	0,3-155	1 - 92	14-30	4-19	13-38	2-54	0,5-47	1-115	32- 192	8-155	3-66	
Luvissolo	17	Média - (CV %)	8-50	50-27	6,8-7,5	1-106	30-46	13-51	32-31	26-37	38-29	86-27	0 -	3-263	14 - 40	20-77	15- 39	2-99	0,1-4 12	4-70	9-46	194- 69	19-108	54- 121	
Neossolo Flúvico	7	Média - (CV %)	16-61	201-53	6,8-10	1-83	17-44	17-75	24-79	42-44	49-13	80-45	0 -	10 -118	13 - 56	24- 124	13-5 5	2-198	0,2- 265	2-60	7-66	225- 89	362- 204	112- 87	
Neossolo Litólico	21	Média - (CV %)	12-71	45-70	5,9-16	3-120	22-57	16-46	42-31	20-31	41-26	71-38	3-28	4-264	14- 100	19-84	14- 96	3-95	0,3- 248	2-115	9-100	559- 292	63-215	418- 308	
Neossolo Quartzarênico	1	Média - (CV %)	10 -	40 -	5,9 -	0,2-	4	14-	58-	25-	56-	74 -	0 -	0 -	2,6 -	3-	3-	0,9-	0-	0,2-	2-	0,1	0	3,4-	
Neossolo Regolítico	13	Média - (CV %)	15-88	72-40	5,9-19	3-97	18-54	14-51	50-28	18-47	33-44	64-46	11 - 201	4-281	9 - 69	14-53	10-6 0	5-85	1- 188	2-55	7-81	209- 88	26-120	83- 182	
Organossolo	3	Média - (CV %)	13-20	55-81	4,5-4,8	15-29	21-3	28-8	32-5	18-24	15,5- 25	24-63	19 - 121	0,4-81	7- 64	27-9	8-45	20-18	1-90	1-86	5-61	55-29	24-82	35- 87	
Planossolo	1	Média - (CV %)	10 -	70 -	7 -	1-	15-	13-	30 -	43 -	53 -	87-	0 -	1 -	8 -	10-	8-	1-	0 -	2-	5-	1-	0,08-	82-	
Plintossolo	1	Média - (CV %)	20 -	20 -	5 -	10-	22-	14-	48 -	17 -	17-	26-	8 -	1 -	5 -	17-	5-	13-	0,4	1-	3-	50-	26-	4-	
Vertissolo	2	Média - (CV %)	28-90	115-6	6,7-9,6	2-76	40-40	20-20	27-62	12-29	40-41	93-1	0 -	10-114	25- 67	26- 68	25- 67	2-85	0 -	4-49	18-89	420- 26	365-75	344- 133	

NP\* = Número de perfis; CV = coeficiente de variação (%); C org. = carbono orgânico; hz sup. = horizonte superficial; AG = areia grossa; AF = areia fina; CTC = capacidade de troca catiônica, CTC ef. = capacidade de troca catiônica efetiva; SB = soma de bases; V = saturação por base; m = saturação por alumínio; Na\_sat = saturação por sódio ; P\_rem = fósforo remanescente; H+Al = acidez potencial; Al = alumínio; Mg = magnésio, K = potássio, P = fósforo.

Foram utilizados os horizontes superficiais já que, os horizontes mais profundos não apresentam interferência nos dados e são nos horizontes superficiais que ocorrem as maiores mudanças (Maciel *et al.*, 2024).

Foi definida a utilização de uma série temporal que abrange o período de janeiro de 2001 a dezembro de 2023. A figura 2 mostra os valores médios do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) referente a cada ano para cada uma das classes e suas tendências. As imagens do NDVI, utilizadas para a posterior identificação das classes, foram obtidas da coleção MODIS/061/MOD13Q1, com resolução espacial de 250 metros. Esses dados são fornecidos pelo *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) [ <https://modis.gsfc.nasa.gov/> ] e foram importados diretamente pela plataforma *Google Earth Engine* (GEE) [ <https://code.earthengine.google.com/06e8a6587f42dcdc80ef213608e497ae> ] .

Figura 2 - Evolução dos valores médios de NDVI no período de 2001 à 2023



Fonte: Elaborado pela autora.

Todo o pré-processamento, incluindo a aplicação do filtro Savitzky-Golay (SG) para remoção de ruídos e execução do teste de Mann-Kendall foi realizado em nuvem. O filtro SG remove ruídos e variações menores, incluindo nuvens, mas também outros efeitos atmosféricos ou distorções, sem distorcer a tendência geral da série (Savitzky & Golay, 1964). Já o teste de Mann-Kendall, um teste não paramétrico para avaliar se há tendência da série

temporal em queda monotônica ou não, foi realizado para identificar qualquer relação de queda, mesmo que não linear.

Considerando os estados iniciais da vegetação, alto ou baixo verdor, e as tendências de ganho de verdor, perda de verdor ou estáveis, seis classes são possíveis. O valor para distinguir os níveis de vigor vegetal que abrange os perfis de solos foi de 0.55 (Maciel *et al.*, 2024). Assim, as seis classes descritas são:

**Classe 1 – Conservada estável:** NDVI médio  $\geq 0.55$ , sem tendência significativa. Representa áreas com vegetação saudável e estável, com alta biomassa vegetal.

**Classe 2 – Degradada estável:** NDVI médio  $< 0.55$ , sem tendência significativa. Essas áreas têm vegetação degradada ou pouca vegetação, mas permanecem estáveis ao longo dos anos, independentemente das variações climáticas, como a chuva.

**Classe 3 – Conservada com ganho de verdor:** NDVI médio  $> 0.55$ , com tendência de aumento. Refere-se a áreas com vegetação saudável, que apresentam uma melhoria contínua ao longo dos anos.

**Classe 4 – Conservada com perda de verdor:** NDVI médio  $> 0.55$ , com tendência de diminuição. Nessas áreas, a vegetação, embora inicialmente saudável, está passando por um processo de degradação ao longo dos anos.

**Classe 5 – Degradada com perda de verdor:** Áreas com vegetação degradada e em deterioração contínua, apresentando uma piora progressiva ao longo dos anos.

**Classe 6 – Degradada com ganho de verdor:** Áreas inicialmente degradadas, mas que mostram uma tendência de recuperação, com melhoria gradual na condição da vegetação ao longo dos anos.

Fazendo a devida reprojeção de dados espaciais, cada classe mencionada teve a sua área calculada a partir da ferramenta *estatísticas zonais da camada raster*, no software QGIS 3.28. A área dos corpos d'água também foi calculada.

As classificações descritas acima consistem em áreas que estão em processo de perda de verdor, aumento de verdor e áreas que não apresentam perda nem ganho, ou seja, áreas consideradas estáveis. Estas classes foram agrupadas na categoria “Tendência” (*Trend*), se as áreas têm apresentado ganho ou perda de verdor e se permanecem estáveis de acordo com os dados do NDVI.

As classes “conservada” e “degradada” foram agrupadas na categoria *Status*, representando áreas com condições ambientais já consolidadas. A junção das categorias *Trend* e *Status* constitui a categoria *Process* mostrando se as áreas conservadas e degradadas têm apresentado melhora no aumento do verdor, uma piora desse verdor ou se são áreas que não conseguem recuperar a sua resiliência. Assim as classes da categoria *Process* são degradadas com perda de verdor, degradada com ganho de verdor, degradada estável, conservada com perda de verdor, conservada com ganho de verdor e conservada estável.

### 2.2.1 Uso da Análise de Componentes Principais – PCA

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com o objetivo de visualizar a distribuição das variáveis relacionadas às mudanças de vegetação ao longo do tempo. A identificação das componentes principais (CPs) a serem utilizadas foi observada no gráfico *Scree Plot* que mostram os autovalores acima de 1. A escolha das duas primeiras componentes se deu pelo critério proposto por Kaiser (1960), cujo autovalores são acima de 1 e a partir do uso do método do cotovelo (Cattell, 1966), que é quando ocorre uma mudança na inclinação da curva em um dos pontos do gráfico.

Uma PCA foi aplicada para a categoria *Trend*, permitindo identificar se as áreas estão em processo de degradação contínua, tendo perda de verdor, ou em recuperação, apresentando ganho de verdor. As regiões onde a vegetação está se deteriorando progressivamente também são chamadas de *browning*, e as áreas onde a vegetação têm apresentado uma tendência de recuperação e melhora ao longo do tempo, denominam-se *greening*. Essa abordagem ajuda a distinguir as tendências de mudança na vegetação, facilitando a análise espacial e temporal dessas variações.

Uma segunda PCA, para a categoria *Status*, foi gerada para expressar o estado atual da vegetação na área de estudo. Isso permitiu identificar se a vegetação se encontrava em boas condições, representando vegetação saudável, ou em condições degradadas, indicando vegetação comprometida. Por fim, uma terceira PCA foi realizada para a categoria *Process*, considerando as seis classes previamente mencionadas. Esta análise permite uma visão mais detalhada e abrangente dos processos dinâmicos de mudança na vegetação, integrando tanto o estado atual quanto as tendências observadas (seja degradação contínua ou recuperação).

Para compreender se há uma relação entre as variáveis do conjunto de dados e verificar como uma variável está associada a outra, foi realizada uma matriz de correlação.

Para interpretar adequadamente essa relação, é necessário distinguir os principais aspectos envolvidos na análise de uma matriz de correlação.

### 2.2.2 Matriz de correlação

Uma matriz de correlação exibe o grau de associação entre variáveis, ou seja, a relação entre elas. Para verificar a associação entre as variáveis foi utilizado a correlação de Spearman representada em uma escala que varia de -1 a 1. Um valor de correlação igual a 1 indica uma correlação positiva perfeita, o que significa que ambas as variáveis aumentam juntas. Por outro lado, uma correlação de -1 indica uma correlação negativa perfeita, onde o aumento de uma variável corresponde à diminuição da outra. Quando os valores de correlação estão próximos de zero, isso indica pouca ou nenhuma relação entre as variáveis. Apenas correlações estatisticamente significativas (com  $p < 0.05$ ) são exibidas no gráfico, enquanto as não significativas são omitidas (em branco).

### 2.2.3 Método de seleção Recursive Feature Elimination – RFE

Com o intuito de encontrar um subconjunto de variáveis que ofereçam melhor desempenho, foi utilizado o método de seleção *Recursive Feature Elimination* (RFE). Um método de seleção muito utilizado em mapeamento digital de solos (MDS) (Kasraei *et al.*, 2024). Essa técnica permite identificar as variáveis mais relevantes, eliminando progressivamente aquelas que têm menor impacto na performance, otimizando assim a capacidade preditiva e reduzindo a complexidade do modelo.

O método de seleção RFE é executado de forma iterativa, iniciando com o treinamento do modelo utilizando todas as variáveis disponíveis. A cada iteração, as variáveis menos importantes, com base em sua ordem de importância decrescente, são removidas (Kasraei *et al.*, 2024). Esse processo ocorre de maneira recursiva, eliminando gradualmente as variáveis menos relevantes até que um subconjunto ideal seja encontrado. Durante esse processo, os desempenhos preditivos são registrados a cada remoção, até que a performance do modelo estabilize ou pare de melhorar (Khun, 2019, Pereira *et al.*, 2024). Com isso, podemos gerar gráficos que mostram o comportamento do desempenho a cada etapa de eliminação das variáveis. A técnica do RFE foi utilizada tendo o modelo *Random Forest* como estimador, ele ajusta vários modelos preditivos usando os diferentes subconjuntos de variáveis e analisa a perda de poder preditivo entre os modelos com a retirada de cada variável. Essa perda é chamada de perda média de acurácia. A modelagem foi feita com validação cruzada repetida em 10 *folds* e 3 repetições (Pereira *et al.*, 2024).

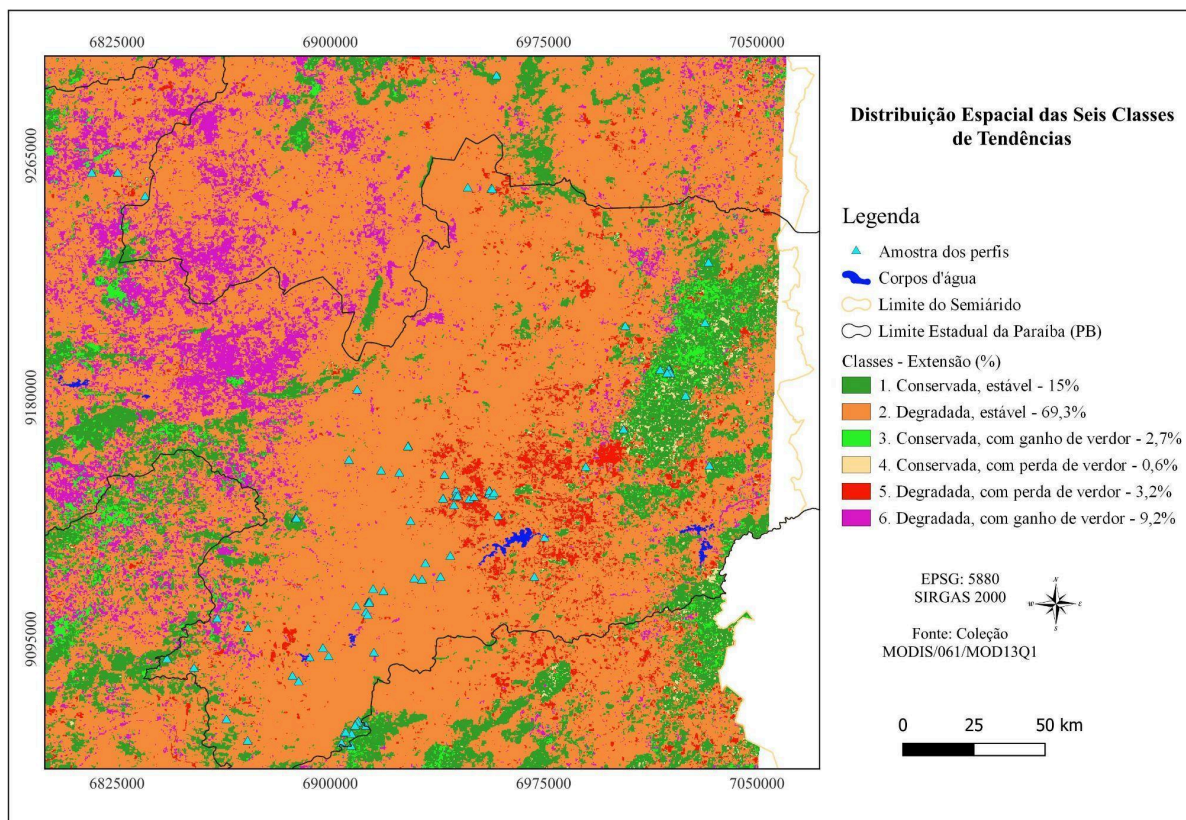
Ao utilizar esse método, a simplificação do modelo resultante da eliminação de variáveis irrelevantes pode melhorar sua interpretabilidade, tornando mais fácil entender as relações entre as variáveis selecionadas e diminuir o risco de *overfitting* (Pereira et al., 2024).

A partir das variáveis mais relevantes de cada ranking gerado pelo algoritmo *Recursive Feature Elimination* (RFE) e sua importância, os quais os resultados da validação cruzada indicaram que os atributos do solo são eficazes na distinção entre os diferentes processos, apresentando alta acurácia.

### 3 RESULTADOS

A classe degradada estável cobre aproximadamente 70% da área total, sendo a de maior extensão (Figura 3). A área conservada estável cobre 15%, e a área degradada com ganho de verdor cobre 9% da área. As classes degradadas com perda de verdor e conservada com ganho de verdor cobrem, aproximadamente 3% da área em extensão, e a classe conservada com perda de verdor cobre aproximadamente 1%.

Figura 3 - Distribuição espacial das seis classes de Tendência



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que em cada classe ocorre a existência de mais de um perfil de solo. As classes degradadas com perda de verdor, degradadas com ganho de verdor, degradadas estável, conservadas com perda de verdor, conservadas com ganho de verdor e conservadas estável apresentam respectivamente, 9, 4, 51, 4, 5 e 19 perfis de solos. A maior parte dos perfis analisados se encontram nas áreas estáveis, predominantemente nas áreas degradadas, seguido das áreas conservadas (Tabela 2).

Ainda na Tabela 2 é possível observar que os valores de coeficiente de variação (CV) de todas as variáveis, exceto pH, são superiores a 20% indicando uma grande variação dos solos que compõem cada classe. Entre todas as classes, somente a conservada com perda de verdor apresenta um coeficiente de variação inferior a 20% para a variável silte, também indicando maior heterogeneidade entre as classes.

A variável  $Al^{3+}$  apresenta o CV inferior a 100% nas classes conservadas, indicando um comportamento mais homogêneo nestas classes se comparado com as classes degradadas cujo os valores variam bastante em relação à média. O mesmo acontece com a saturação por alumínio no qual as áreas conservadas aparentam ser mais homogêneas do que nas áreas em degradadas que possuem o CV acima dos 200% indicando extrema variabilidade.

A saturação por alumínio nas áreas degradadas apresenta valores inferiores em relação às áreas conservadas. Nas áreas degradadas com perda de verdor, degradadas com ganho de verdor e degradadas estável, os valores da saturação por alumínio respectivamente são 0,8%, 0,34% e 2%. Nas áreas conservadas com perda de verdor, conservadas com ganho de verdor e conservadas estável os valores são respectivamente 33%, 44% e 32%.

O teor de K,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , saturação por base, CTC, CTC efetiva e fósforo apresentam valores até duas vezes mais altos nas áreas degradadas do que as áreas que estão conservadas. Na classe degradada com perda de verdor as variáveis K,  $Na^+$ , SB, V e P<sub>rem</sub> apresentam os valores de CV mais baixos do que os que se encontram nas demais classes, sugerindo maior homogeneidade entre as amostras.

Os teores de carbono orgânico apresentam valores próximos entre as classes degradadas com perda de verdor, degradada com ganho de verdor, degradada estável, conservada com perda de verdor, conservada com ganho de verdor e conservada estável. Essa similaridade também é observada na variável  $Mg^{2+}$  e nas variáveis físicas: areia grossa, areia fina, argila e silte.

Tabela 2 - Percentagem dos valores do coeficiente de variação (CV) e média dos horizontes superficiais dos perfis de solos contidos nas classes Degradada com perda de verdor, Degradada com ganho de verdor, Degradada estável, Conservada com perda de verdor, Conservada com ganho de verdor e Conservada estável

Classes	NP*	Espessura hz sp. (cm)		Espessura total do perfil (cm)		pH em H <sub>2</sub> O		K		Na <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		Al <sup>3+</sup>		H+Al		SB		V%		m%		P <sub>rem</sub>		C. orgânico (%)		CTC efetiva		CTC		P		AG (%)		AF (%)		Argila (%)		Silte (%)	
		CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)			
Degradada com perda de verdor	9	8	49	63	68	6,2	14	222	69	35	84	8	66	3	86	0,05	204	3	77	12	62	77	23	0,8	203	39	20	3	72	12	61	15	44	20	89	36	41	24	29	28	68	11	54
Degradada com ganho de verdor	4	7	42	120	47	6	11	177	114	49	166	10	132	2	120	1	128	7	61	16	84	39	120	0,34	200	38	36	2	49	18	73	52	56	65	110	29	58	28	105	27	74	16	49
Degradada estável	51	12	75	82	91	6,5	13	340	311	87	344	8	57	3	89	0,1	370	2	131	12	67	81	28	2	454	40	31	2	130	12	66	16	76	241	346	40	39	24	50	21	46	16	56
Conservada com perda de verdor	4	40	73	96	72	4,9	13	128	128	13	98	5	166	2	138	1	97	6	84	7	157	36	68	33	69	47	30	4	156	7,5	135	13	103	11	179	40	26	22	12	24	47	14	3
Conservada com ganho de verdor	5	17	28	118	31	4,8	12	41	160	9	137	1	117	1	51	1,4	63	8	46	20	97	26	109	44	71	29	41	3	59	4	26	10	23	2	34	41	22	12	66	38	48	9	59
Conservada estável	19	17	65	84	60	5	19	108	150	28	175	7	159	2	107	1	99	9	82	9	143	40	90	32	102	26	47	5	114	10	120	18	64	30	275	39	38	18	47	27	52	16	58

NP\* = Número de perfis; CV = coeficiente de variação (%); C orgânico = carbono orgânico; hz sup. = horizonte superficial; AG = areia grossa; AF = areia fina; CTC = capacidade de troca catiônica, CTC ef. = capacidade de troca catiônica efetiva; SB = soma de bases; V = saturação por base; m = saturação por alumínio; Na<sub>sat</sub> = saturação por sódio; P<sub>rem</sub> = fósforo remanescente (mg/L); H+Al = acidez potencial; Al = alumínio; Mg = magnésio. Unidades de K, Na<sup>+</sup> e P é: mg/dm<sup>3</sup>

### 3.1 Redução de Dimensionalidade por Componentes Principais

A Tabela 3 apresenta a quantidade de variância explicada por cada componente principal (CP), auxiliando na determinação do número ideal de componentes a serem mantidos na análise. Ela destaca os componentes que mais contribuem para a variabilidade total dos dados, facilitando a interpretação e a seleção.

Tabela 3 - Tabela mostrando as componentes principais com autovalores acima de 1, percentual explicativo de cada uma e o percentual cumulativo

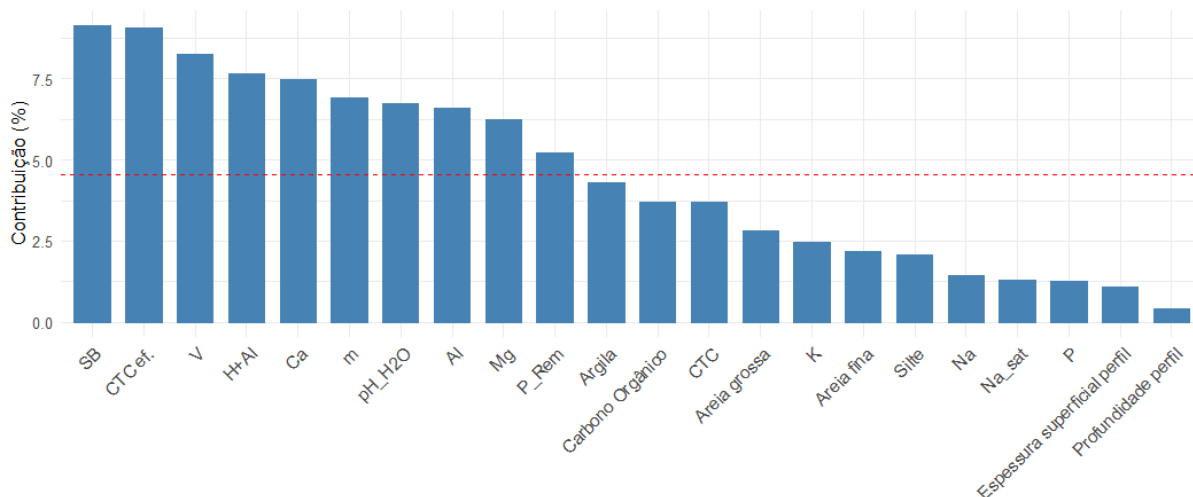
Componente	Autovalores	Porcentagem de variância	Porcentagem cumulativa de variância
Comp. 1	6.7	31	31
Comp. 2	3.7	17	48
Comp. 3	2.2	10	58
Comp. 4	2.0	9	67
Comp. 5	1.5	7	74
Comp. 6	1.3	6	80

Fonte: Dados gerados pelo R, organizado pela autora.

As seis primeiras componentes principais (Tabela 3) apresentaram autovalores (*eigenvalues*) superiores a 1, explicando, respectivamente, 30,6%, 16,9%, 10,1%, 9,26%, 6,89% e 5,88% da variância total.

As variáveis de caráter químico são as que apresentam uma contribuição acima da média para cada componente (Figura 4). As variáveis que contribuem para as duas componentes principais acima da média são, soma de bases, CTC efetiva, saturação por base, acidez potencial,  $\text{Ca}^{2+}$ , saturação por alumínio, pH em água,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e P\_rem. As demais variáveis como, superfície e profundidade do solo, argila, carbono orgânico, CTC, areia grossa, K, areia fina, silte,  $\text{Na}^+$ , saturação por sódio, P, têm sua contribuição de forma menos expressiva.

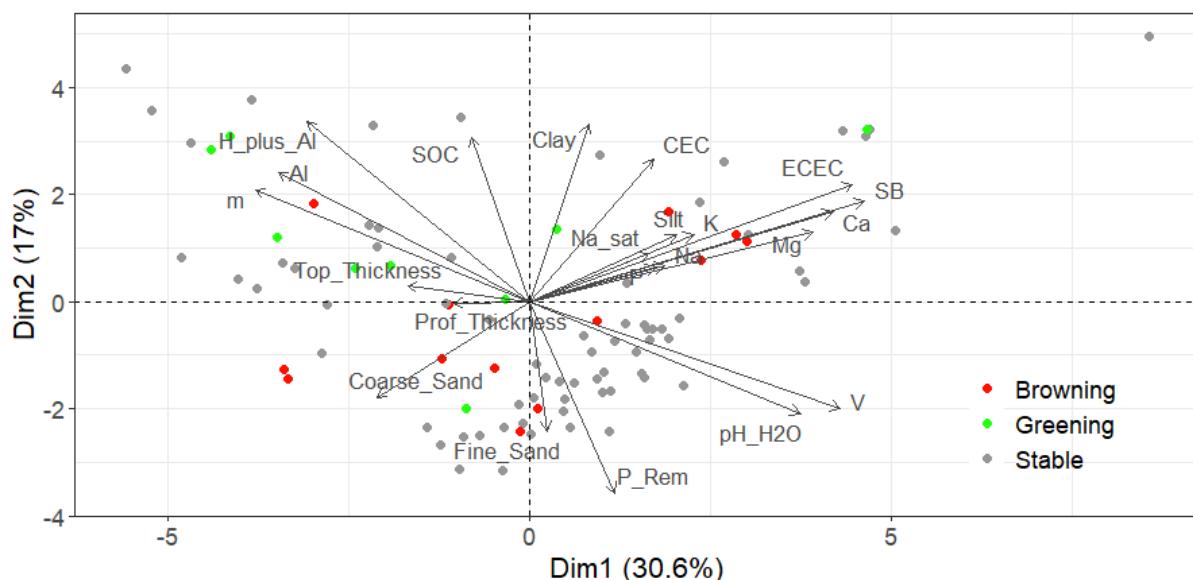
Figura 4 - Gráfico mostrando as variáveis originais que mais contribuem para as duas componentes principais (Dim1 e Dim2). A linha tracejada de cor vermelha é a média



Fonte: Elaborado pela autora.

O primeiro componente indica antagonismo entre o teor de bases, CTC ef. e o teor de acidez potencial nos solos (Figura 5). Isso expressa a diferença entre solos com maior CTC ef. e bases trocáveis no complexo de troca com solos de menor CTC ef. e com maior teor de acidez potencial no complexo de troca. O segundo componente indica antagonismo entre o teor de areia e P\_rem com o teor de carbono orgânico e argila. Isso indica a diferença de reatividade entre perfis com alto teor de areia e baixa afinidade por P com solos com altos teores de carbono orgânico e argila.

Figura 5 - PCA apresentando a tendência do verdor - *Trend*



Fonte: Elaborado pela autora.

Cerca de 76% dos perfis se encontram em áreas estáveis em relação à tendência do verdor (*Trend*). Aproximadamente 43% desses perfis concentram-se no quarto quadrante da PCA, e apresentam afinidade com as variáveis saturação por base, pH em água, P\_rem e areia

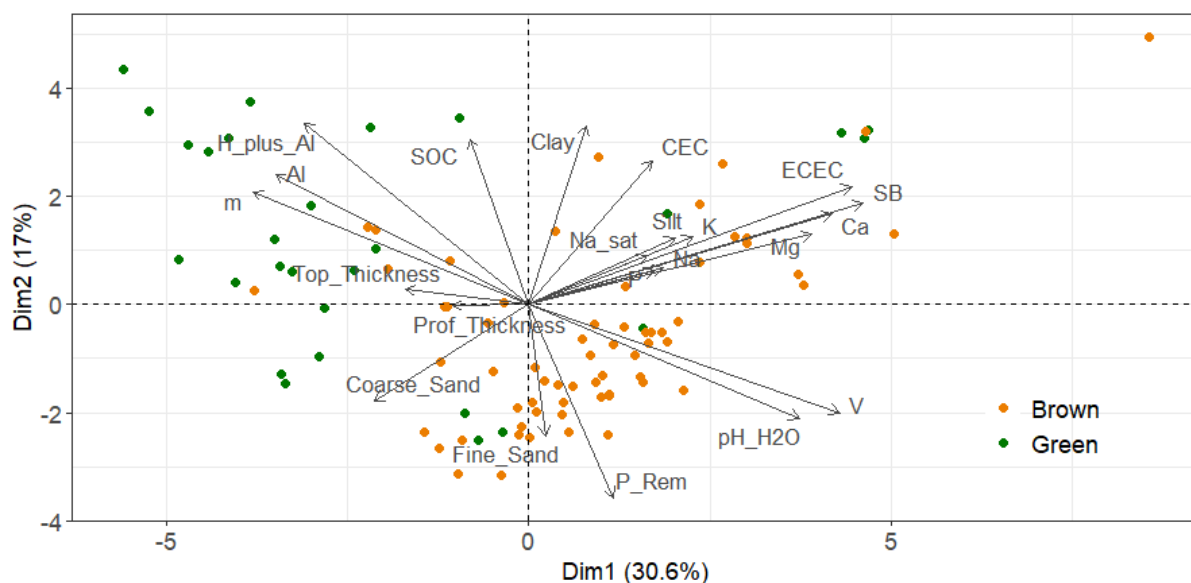
fina (Figura 5). O restante dos perfis que estão em áreas estáveis distribuem-se no segundo, terceiro e primeiro quadrantes, respectivamente, apresentando 21%, 19% e 17%. As demais áreas, com perda de verdor e ganho de verdor, representam 14% e 10% dos perfis, respectivamente. Perfis que indicam ganho de verdor distribuem-se em todos os quadrantes da PCA, exceto no quarto quadrante.

Os perfis que estão presentes nas áreas com ganho de verdor distribuem-se respectivamente nos segundo, primeiro e terceiro quadrantes com 67%, 22% e 11%. Estes perfis estão associados com as variáveis acidez potencial, teor de  $Al^{3+}$ , saturação por alumínio, argila e CTC efetiva. Já os perfis presentes nas áreas com perda de verdor, distribuem-se em todos os quadrantes, com 46% no terceiro quadrante, 31% no primeiro, 15% no quarto e 8% no segundo. Estes perfis possuem afinidade com as variáveis  $Na^+$ , saturação por sódio,  $Mg^{2+}$ , K, silte, areia fina e areia grossa.

Na PCA que representa o estado atual da vegetação - *Status* - 70% dos perfis se encontram nas áreas degradadas e os 30% restantes indicam áreas conservadas (Figura 6). No segundo quadrante ocorre a predominância de perfis na classe conservada, com 57% dos perfis classificados nesse *status* e apresentam afinidade com as variáveis matéria orgânica, acidez potencial, alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), teor de  $Al^{3+}$  e horizonte superficial. Embora de forma menos expressiva, essa mesma classe também ocorre nos outros três quadrantes, apresentando aproximadamente 25% dos perfis no terceiro quadrante, 14% no primeiro quadrante e 4% no quarto quadrante.

Os perfis da classe degradada ocorrem de forma distribuída, apresentando aproximadamente 48% dos perfis no quarto quadrante. As variáveis saturação por base, pH em água e  $P_{rem}$  possuem altos escores nesse quadrante. Aproximadamente 22% dos perfis representantes da classe degradada estão incluídos no primeiro quadrante, 20% no terceiro e 9% no segundo quadrante.

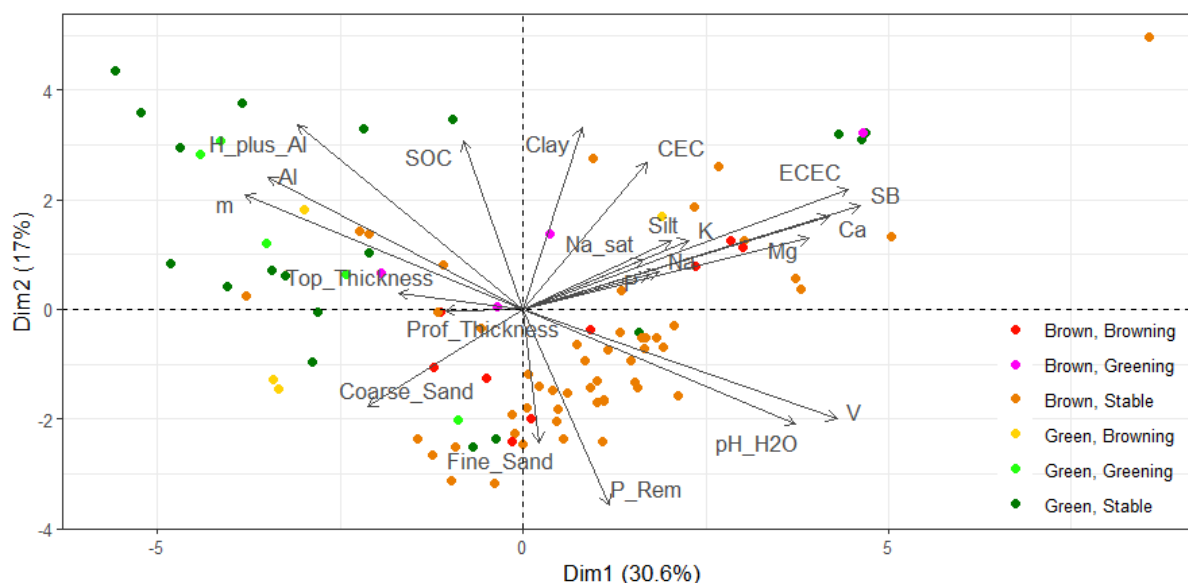
Figura 6 - PCA apresentando o estado atual da vegetação - *Status*. Green com NDVI histórico médio  $\geq 0,55$  e Brown  $< 0,55$



Fonte: Elaborado pela autora.

Os perfis presentes nas áreas degradadas estável representam aproximadamente 55% dos perfis exibidos na PCA que mostram as seis classes existentes - *Process*. Aproximadamente 56,8% dos perfis que indicam degradada estável distribuem-se no quarto quadrante (Figura 7). Os perfis presentes nas áreas degradadas estável apresentam afinidade com as variáveis saturação por base, pH em água e P\_rem. A classe conservada estável, degradada com perda de verdor, conservada com ganho de verdor, degradada com ganho de verdor e conservada com perda de verdor representa 21%, 10%, 5% e 4% nas duas últimas classes, respectivamente. Os perfis nas áreas conservadas estável possuem 58% dos seus perfis no segundo quadrante, seguido por 21% no terceiro, 16% no primeiro e 5% no quarto quadrante. As variáveis do segundo quadrante, que possuem 58% da classe conservada estável, são carbono orgânico, acidez potencial, alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ) e teor de alumínio.

Figura 7 - PCA mostrando as seis classes existentes - *Process*



Fonte: Elaborado pela autora.

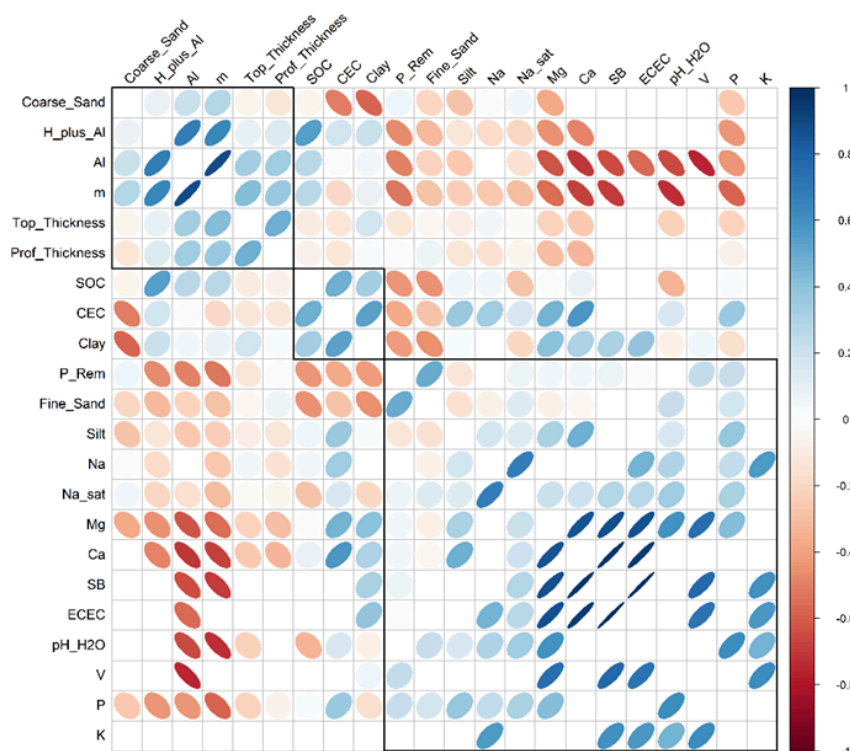
A classe conservada com ganho de verdor apresenta 80% dos seus perfis no segundo quadrante, associada às variáveis saturação por base, pH em água e P\_rem. Os 20% dos perfis restantes distribuem-se no terceiro quadrante. Já a classe degradada com ganho de verdor distribuem-se com 50% dos seus perfis igualmente no primeiro e no segundo quadrantes. Esses quadrantes são associados com as variáveis argila, CTC efetiva e horizonte superficial.

Os perfis da classe conservada com perda de verdor apresentam 50% dos seus perfis no terceiro quadrante e apresentam afinidade com a variável original areia grossa. Em seguida, 25% dos perfis nas áreas conservadas com perda de verdor distribuem-se no primeiro e no segundo quadrantes. No quarto quadrante não apresenta perfis da classe conservada com perda de verdor. A classe degradada com perda de verdor aparece no terceiro, primeiro e quarto quadrante apresentando aproximadamente 44%, 33% e 22% dos perfis, respectivamente. Os perfis das áreas degradadas com perda de verdor do terceiro quadrante apresentam afinidade com as variáveis areia grossa e profundidade. Essa classe só não aparece no segundo quadrante.

### 3.2 Correlação observada entre as variáveis

A matriz de correlação apresentada abaixo (Figura 8) possui quadrados pretos ao redor de alguns grupos de variáveis indicando agrupamentos hierárquicos baseados nas correlações. Esse agrupamento hierárquico realizado no *software* R, identifica as variáveis que apresentam comportamento semelhante. São grupos que apresentam máxima similaridade dentro do grupo e, paralelamente, máxima distinção entre os grupos (Hair *et al.*, 2009).

Figura 8 - Matriz de correlação. A alongacidade das elipses aumenta com a proximidade de valores -1 e +1



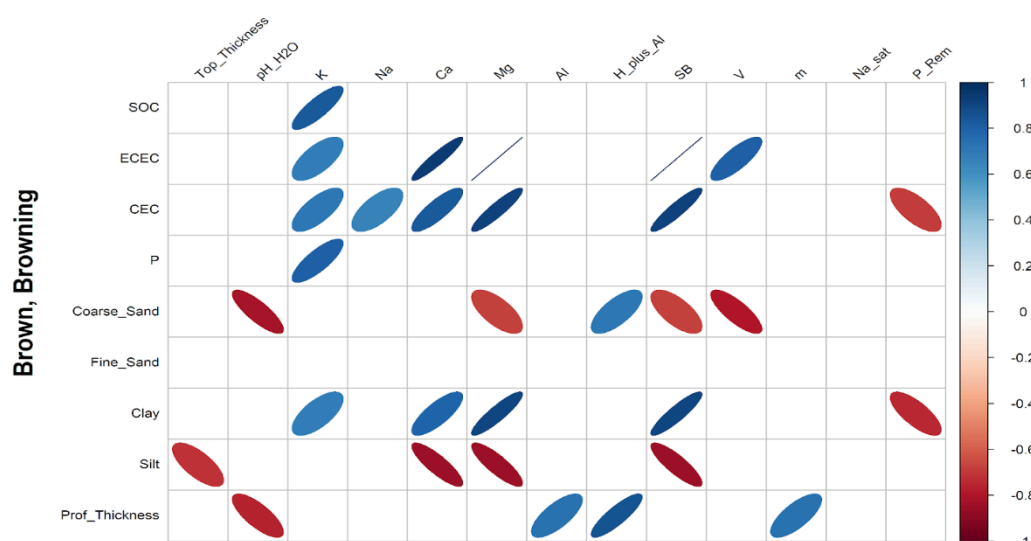
Quadros em branco indicam correlação não significativa ( $p < 0.05$ )

Identificamos coeficientes de correlação de Spearman mais significativos e positivos para alumínio, saturação por alumínio e acidez potencial, hierarquizados num primeiro grupo. Em um segundo grupo hierarquizado, nota-se a correlação entre o carbono orgânico do solo, argila e CTC. Já em um terceiro grupo, identificamos a correlação das seguintes variáveis:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB, CTC efetiva e saturação por base (V).

Fazendo a correlação entre o conjunto de diferentes variáveis para as classes degradadas com perda de verdor, degradada estável, conservado com ganho de verdor e conservada estável, é percebido tanto correlações significativas e positivas, quanto significativas e negativas. Para as classes degradadas com ganho de verdor e conservada com perda de verdor não foi possível fazer essa correlação por não ter o número mínimo de observações que o *software* R sugere.

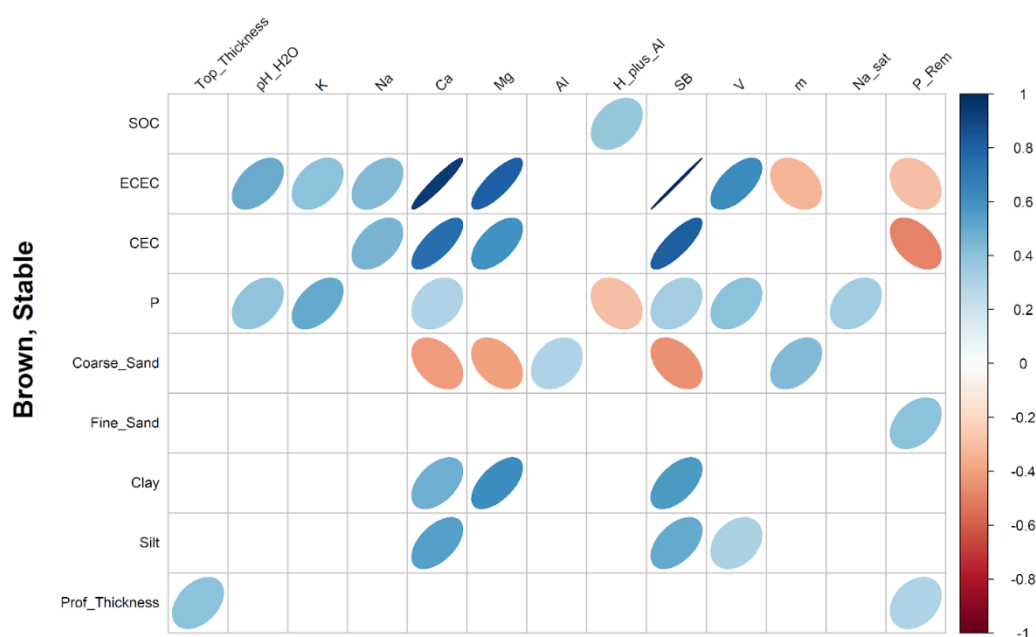
Percebe-se que as correlações positivas e negativas diferem entre as variáveis físicas e químicas. Na correlação entre as variáveis da classe degradada com perda de verdor observa-se correlações moderadas à forte, tanto positivas quanto negativas (Figura 9).

Figura 9 - Correlação entre as variáveis na classe degradada com perda de verdor



Fonte: Elaborado pela autora. Quadros em branco indicam correlação não significativa.

Figura 10 - Correlação entre as variáveis na classe degradada estável

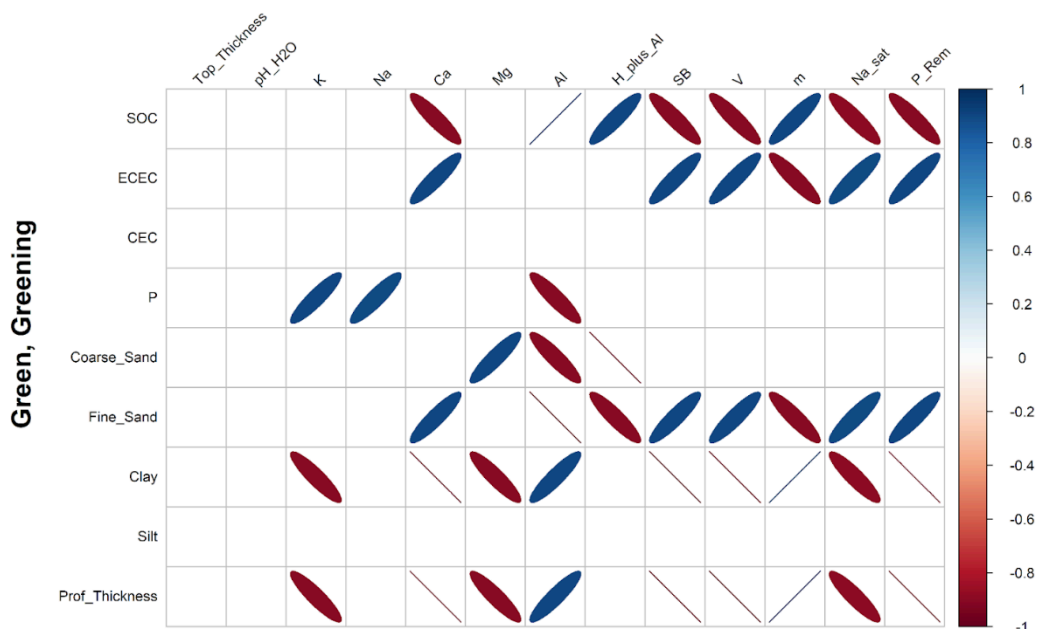


Fonte: Elaborado pela autora. Quadros em branco indicam correlação não significativa.

Dentre as variáveis em estudo é observado a correlação das mesmas tanto nas áreas conservada estável (Figura 10) e conservada com ganho de verdor (Figura 11). Em ambas as classes, a areia fina apresenta correlação com fósforo remanescente. Diferentemente da classe degradada estável que tem somente esta correlação com areia fina, na classe conservada com ganho de verdor existem correlações positivas com  $\text{Ca}^{2+}$ , soma de bases, saturação por base,

saturação por sódio e fósforo remanescente e uma correlação negativa com acidez potencial, teor de alumínio e uma correlação negativa perfeita com alumínio trocável.

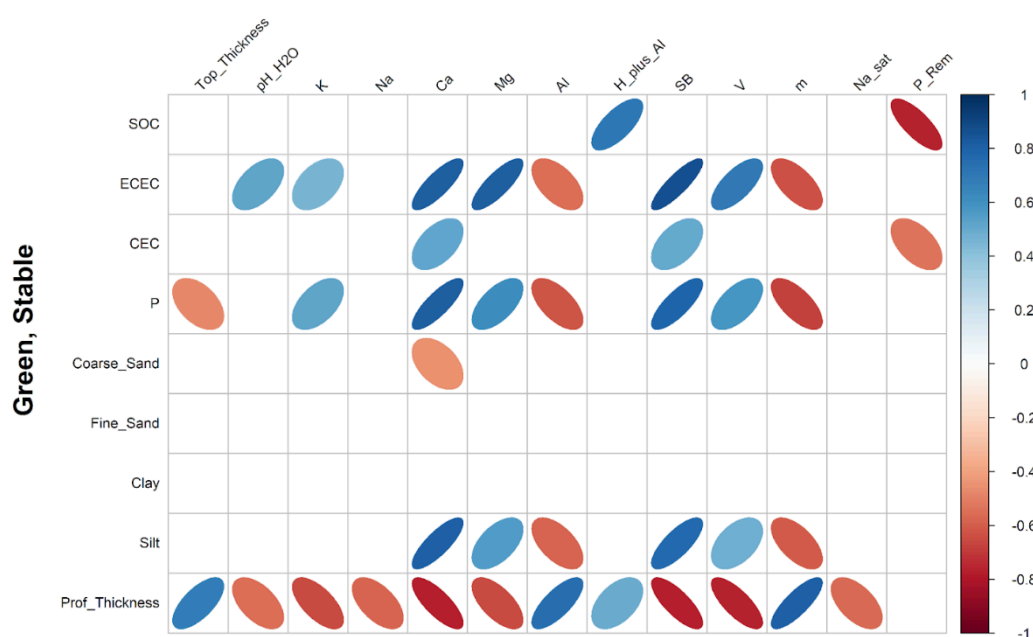
Figura 11 - Correlação entre as variáveis na classe conservada com ganho de verdor



Fonte: Elaborado pela autora. Quadros em branco indicam correlação não significativa.

É observado que não ocorre nenhuma correlação das variáveis em estudo com as variáveis horizonte superficial, pH, capacidade de troca catiônica e silte. Nesta classe, conservada com ganho de verdor, as correlações existentes são mais intensas em relação às outras. Também é verificado que não ocorre nenhuma correlação das variáveis com areia fina e argila (Figura 12).

Figura 12 - Correlação entre as variáveis na classe conservada estável



Fonte: Elaborado pela autora. Quadros em branco indicam correlação não significativa.

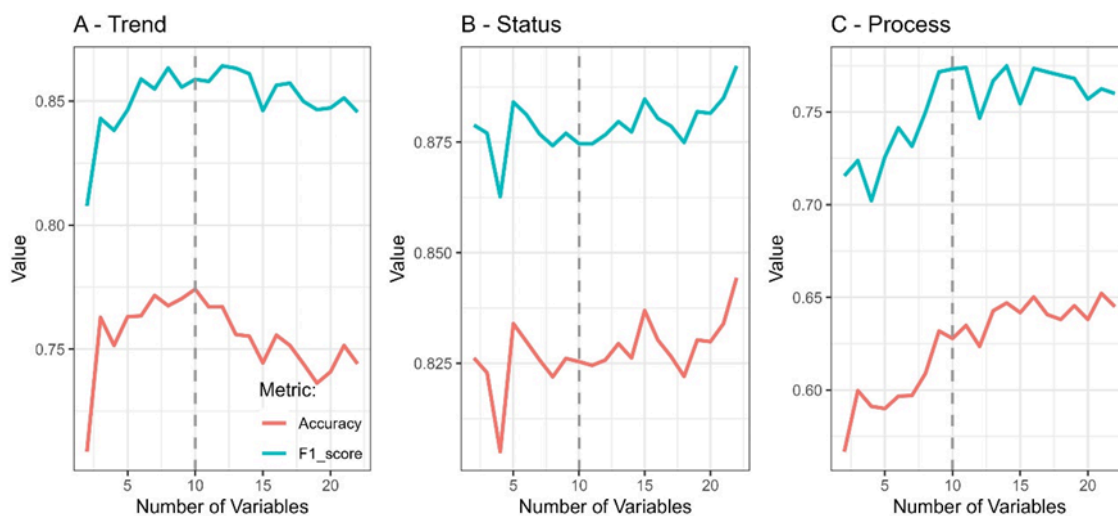
Em todas as correlações, as classes estáveis apresentam correlações positivas de fraca a moderadas se compararmos com àquelas que estão em processo de piora ou melhora das suas áreas. Nestas correlações observamos uma similaridade entre aquelas variáveis que apresentam correlação em todas as quatro classes. Entre as variáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e CTC efetiva a correlação acontece positivamente e em todas é uma correlação forte. A soma de bases e CTC efetiva também há alta correlação, mas nas áreas degradadas a correlação acontece de forma perfeita.

Por fim, também observamos a correlação das variáveis potássio e fósforo nas quatro classes, degradada com perda de verdor, degradada estável, conservada com ganho de verdor e conservada estável. Nas áreas de alteração, seja para melhora ou piora ao longo do tempo, as correlações são fortes, diferentemente das áreas estáveis onde a correlação acontece de forma moderada.

### 3.3 Identificação das variáveis através do *Machine Learning* – seleção e *ranking*

Uma performance preditiva em relação ao número de variáveis usado mostrou que um número reduzido de variáveis estabiliza a performance dos modelos no patamar mais elevado (Figura 13). Significa que acima de 10 variáveis não há ganho e pode haver até perda de desempenho, decisivo ao *overfitting*.

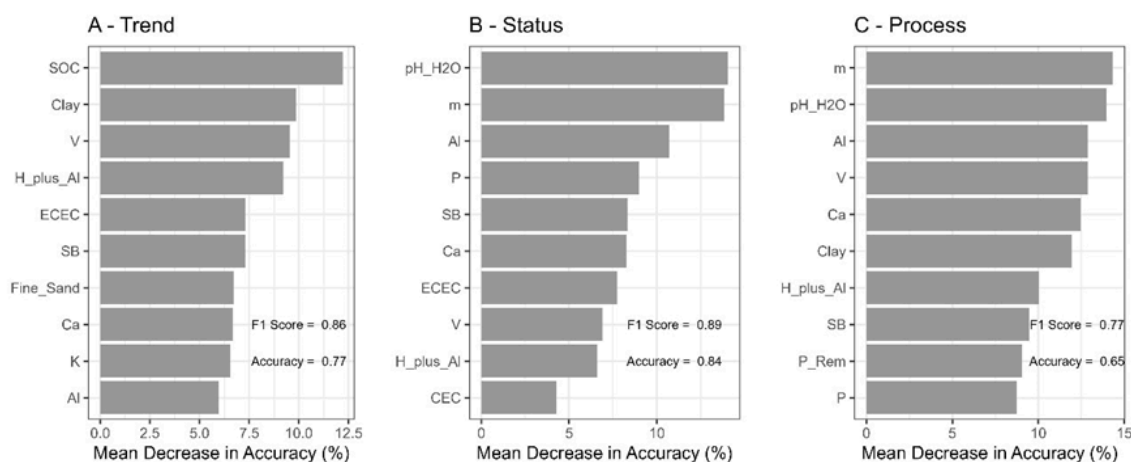
Figura 13 - Performance preditiva em relação ao número de variáveis usado. A – *Trend* (estável, ganho de veredor ou perda de veredor); B – *Status* (conservada ou degradada); C – *Process* (combinação das classes anteriores)



Fonte: Elaborado pela autora. Curva em azul é a métrica de avaliação de desempenho F1-score e a curva em vermelho é a métrica de avaliação de desempenho *Accuracy*.

Com a representação gráfica do RFE, utilizado para seleção e *ranking* de importância, é observado o desempenho médio do modelo em relação às variáveis. Nos gráficos “*Trend*” (A), “*Status*” (B) e “*Process*” (C) obteve-se as variáveis consideradas mais importantes para a análise (Figura 14).

Figura 14 - *Ranking* de importância mostrando o top 10 variáveis mais importantes



Fonte: Elaborado pela autora. Um valor de *Mean Decrease in Accuracy* de 10%, indica que o modelo perde 10% de desempenho preditivo com a retirada da variável.

Para o modelo de *Trend*, nota-se que as variáveis importantes foram, carbono orgânico, argila, saturação por base, acidez potencial, CTC efetiva, soma de bases, areia fina,  $\text{Ca}^{2+}$ , K e  $\text{Al}^{3+}$ . No segundo modelo, *Status*, temos as variáveis pH em água, saturação por alumínio,

$Al^{3+}$ , P, soma de bases,  $Ca^{2+}$ , CTC efetiva, saturação por base, acidez potencial e CTC. Por fim, as variáveis ranqueadas para o modelo de *Process* foram, saturação por alumínio, pH em água,  $Al^{3+}$ , saturação por base,  $Ca^{2+}$ , argila, acidez potencial, soma de bases, P<sub>rem</sub> e P.

De todas as variáveis ranqueadas, observa-se que algumas que apareceram no primeiro modelo também aparecem para segundo e para o terceiro modelo. As variáveis que aparecem nos três modelos mostrados são, saturação por base, acidez potencial, soma de bases,  $Al^{3+}$  e  $Ca^{2+}$ .

Já as variáveis P, saturação por alumínio e pH em água, aparecem somente nos modelos *Status* e *Process*. Variáveis como argila e CTC efetiva, também aparecem somente em dois modelos. A argila ocorre no modelo *Trend* e *Process*, enquanto a CTC efetiva, ocorre no modelo de *Trend* e no modelo *Status*.

Também observou-se que, as variáveis carbono orgânico, areia fina, K, CTC e P<sub>rem</sub>, apareceram somente em um modelo cada. As três primeiras variáveis apareceram no modelo de *Trend*, CTC no modelo *status* e por fim, P<sub>rem</sub> no modelo *Process*.

#### 4 DISCUSSÃO

Devido às particularidades da relação solo-vegetação, compreender a complexidade na identificação das causas da degradação dos solos é fundamental, seja em escala local ou regional. Isto nos mostra a necessidade de uma abordagem integrada, que considere um conjunto de indicadores físicos, químicos e biológicos (Souza *et al.*, 2009; Mirzabaev *et al.*, 2019; Macedo *et al.*, 2021) para então termos maior clareza em como essas interações acontecem.

A interpretação desses indicadores não é algo simples, principalmente em regiões como o semiárido brasileiro, onde a complexidade do seu espaço geográfico e a diversidade da vegetação em florestas secas (IBGE, 2004; Schaefer, 2013) apresentam sensibilidade às alterações climáticas e à desertificação (Mirzabaev *et al.*, 2019; Maciel *et al.*, 2024). A diversidade da floresta seca é regulada por propriedades climáticas, adaptada às estações secas e chuvas irregulares e influenciada pelas propriedades pedológicas (Castro Oliveira *et al.*, 2019; Maciel *et al.*, 2024; Pereira *et al.*, 2024).

A análise do *ranking* de importância permitiu identificar as variáveis consideradas mais importantes nos estágios *Trend*, *Status* e *Process*, constatando que a saturação por base, acidez potencial, soma de bases,  $Al^{3+}$  e  $Ca^{2+}$  foram relevantes nos três estágios analisados. A

saturação por base (V%) representando a proporção da capacidade de troca catiônica ocupada por cátions básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , K,  $\text{Na}^+$ ) e usada como um dos indicadores da fertilidade química natural do solo (Ronquim, 2010; Kämpf *et al.*, 2015; Melo & Alleoni, 2019) mostra uma variabilidade entre as áreas degradadas e as áreas conservadas. As áreas conservadas com perda de verdor, conservadas com ganho de verdor e conservadas estável possuem valor V% inferior a 50% apontando que nestas áreas os solos são distróficos (Kämpf *et al.*, 2015).

Diferentemente das áreas conservadas, exceto degradadas com ganho de verdor que também apresenta valor V% inferior a 50%, as áreas degradadas com perda de verdor e degradadas estável se destacam com o valor da saturação por base acima de 50% o que é esperado para locais onde a taxa de intemperismo e de pluviosidade são baixas além de indicar que os solos dessas áreas possuem um caráter eutrófico (Kämpf *et al.*, 2015; Francisco *et al.*, 2017). Esse resultado em quatro das seis classes, conservadas com perda de verdor, conservadas com ganho de verdor, conservadas estável e degradadas com ganho de verdor, apresentarem baixo valor de saturação por bases não era esperado já que a área de estudos caracteriza-se por baixos índices pluviométricos e intemperismo incipiente (Araújo Filho *et al.*, 2022; Maciel *et al.*, 2024).

Nas regiões onde o regime pluviométrico é reduzido e tem-se como resultado um baixo intemperismo, os minerais primários acabam sendo preservados e a lixiviação dos cátions básicos é reduzida (Araújo Filho *et al.*, 2022). Isso é diferente do esperado nas classes com baixo valor de V%, indicando elevada acidez (Rawal *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023).

A acidez potencial (H+Al) é toda acidez presente no solo quando este atinge o  $\text{pH} = 7,0$ . A acidez potencial das áreas conservadas são mais elevadas do que as das áreas degradadas, exceto as áreas degradadas com ganho de verdor. Apesar das áreas em estudo não passarem por um processo intenso de intemperismo as áreas com tendência de aumento de verdor apresentam baixo valor V%, então essa baixa saturação por base pode ser atribuída a uma decomposição da matéria orgânica que é fonte de acidez (Guo *et al.*, 2024) e está liberando esses ácidos para o meio rebaixando o V%. Isto também é possível de observar nas áreas degradadas que está aumentando o seu verdor, que também possui valor V% baixo e uma quantidade de H+Al muito alta.

As quatro classes que apresentaram baixo valor V% são as mesmas quatro classes que apresentaram solos moderadamente ácidos em comparação às classes degradadas com perda de verdor e degradadas estável que possuem valor de  $\text{pH}$  de 6,2 e 6,5 respectivamente. Nas áreas conservadas a acidez ativa da classe conservadas com ganho de verdor se destaca por ser a classe mais ácida ( $\text{pH} = 4,8$ ) em relação às demais e em áreas com maior cobertura

vegetal como visto por Lima *et al.* (2020) áreas com maior concentração de  $\text{Al}^{3+}$  e H+Al contribuíram para valores mais baixos de pH assim como observado nas áreas conservadas com ganho de verdor com as concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  ( $1,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ ) e H+Al ( $8 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ ). As áreas degradadas com perda de verdor e degradadas estável que não possuem valor V% baixo mostram que a presença do carbono orgânico é pouca ou a sua decomposição não reduz o valor da saturação por bases porque não aumenta de forma considerável a acidez do solo.

O pH do solo determinado pela atividade de íons hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) é o que caracteriza a acidez ou alcalinidade do solo (Kämpf *et al.*, 2015; Benti & Kuris, 2024). Ele atua diretamente na disponibilidade de elementos essenciais para as plantas como nitrogênio, fósforo e potássio (Benti & Kuris, 2024) apesar dos seus efeitos para a disponibilidade de nutrientes não ocorrerem somente com influências da reação no solo já que tanto as raízes quanto os solos possuem cargas variáveis (Barrow & Hartemink 2023). O pH das áreas degradadas indicaram ser moderadamente ácido a neutro enquanto nas áreas conservadas os solos apresentaram valor de pH moderadamente ácidos, como nos estudos de Araújo Silva *et al.*, (2024) em relação a dinâmica de nutrientes na Caatinga, tanto em áreas conservadas como em áreas antropizadas no semiárido nordestino.

Onde existe maior aporte de acidez, ocorre a diminuição do V% e um aumento da quantidade de H+Al e não necessariamente onde a presença do carbono orgânico é maior, mas sim onde a acidez é elevada (Guo *et al.*, 2024). Solos com acidez ativa moderada a neutra como é o caso das áreas de estudo tem a ver com a aceleração da decomposição da matéria orgânica (Tonon *et al.*, 2010). Quando essa decomposição ocorre e produz mais acidez, esta diminui a V% e isso deixa o ambiente mais claramente distinto do outro mostrando se as áreas têm apresentado uma mudança no seu estado vegetal, ganhando ou perdendo verdor ou se permanecem estáveis, atrelado às áreas que já se encontram conservadas ou degradadas.

O carbono orgânico é uma das principais características do solo que influencia processos físico-químicos, biológicos, estrutura do solo e no desenvolvimento de culturas, além de ser uma variável positivamente correlacionada com NDVI devido a reflexão da luz no espectro visível (Shahriari *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2018; Zhang 2019; Mousavi *et al.*, 2023; de Souza Medeiros *et al.*, 2023).

O processo de estabilização do carbono orgânico é uma ação que desacelera a decomposição da matéria orgânica ocorrendo de diversas formas seja por mecanismos físicos, químicos e biológicos (Singh *et al.*, 2018). Essa estabilização acontece na formação dos agregados do solo a partir dos argilominerais e de íons como  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  que protegem

fisicamente a matéria orgânica dentro dos agregados, dificultando a ação dos microorganismos ao carbono (Rodríguez-Albarracín *et al.*, 2023).

A partir das interações químicas com os íons polivalentes e interação das forças de van der Waals ocorre a precipitação do carbono orgânico em complexos estáveis (Singh *et al.*, 2018; Rodríguez-Albarracín *et al.*, 2023), assim como na proteção física, as ligações entre os íons e as moléculas orgânicas diminuem a disponibilidade do carbono para os microorganismos e conseqüentemente reduzem a sua decomposição.

O carbono orgânico representa 58% da composição da matéria orgânica (Silva & Mendonça, 2007) e isso contribui para a formação e estabilização de agregados, disponibilidade de nutrientes para a vegetação e retenção de água no solo (Silva & Mendonça, 2007; Hoffland *et al.*, 2020). Rawls *et al.* (2003), Feifel *et al.* (2024) corroboram para essas informações ao mostrar que o aumento no teor de carbono orgânico contribui consideravelmente para a retenção de água, principalmente em solos de textura mais arenosa além da presença de polissacarídeos e compostos orgânicos que fazem parte da agregação dos solos contribuírem na disponibilidade de nutrientes pois um solo bem agregado tem menor lixiviação e melhora a retenção de nutrientes (Ramírez *et al.*, 2023).

Compreender estas características do carbono orgânico são primordiais, podendo contribuir para contenção do avanço da desertificação no semiárido brasileiro. Carbono orgânico foi a variável de maior importância selecionada no estágio *Trend* indicando o processo de mudança de verdor, seja o aumento de verdor, perda de verdor ou se estão estáveis. Tanto nas áreas degradadas quanto nas áreas conservadas o teor de carbono orgânico são baixo com a média variando entre 2% e 5%, no entanto as áreas conservadas com perda de verdor, conservadas estável e degradadas estável mostraram uma variabilidade elevada, já as áreas degradadas com perda de verdor, degradadas com ganho de verdor e conservadas com ganho de verdor apresentaram um CV abaixo de 80% de variabilidade dos dados, mas ainda sim apresentam dados bastante heterogêneos.

No entanto, as áreas de domínio da Caatinga ainda sofrem com o manejo inadequado de suas terras, principalmente no uso agropecuário e extrativista reduzindo o estoque de carbono orgânico, serapilheira e material orgânico que tem o papel fundamental na retenção de umidade e seus nutrientes (Ribeiro *et al.*, 2015; Vieira *et al.*, 2015; Araújo A. *et al.*, 2024) e esse conjunto de ações intensifica o avanço da desertificação nas áreas semiáridas.

A argila também é uma característica de grande valor para os solos. A sua presença auxilia tanto na estabilização do carbono orgânico, condutividade hidráulica quanto na retenção da água e nutrientes no solo (Shabou *et al.*, 2015; Kaiser & Silva, 2023). A presença

de solos com elevados teores de argila contribuem mais significativamente se comparados com solos arenosos e siltosos (Drescher *et al.*, 2023; Rodríguez-Albarracín *et al.*, 2023) e isto se deve a característica de estado coloidal da argila, a qual possui cargas elétricas e também maior área superficial específica (Melo & Alleoni, 2019).

Os minerais de argila contribuem para processo de estabilização do carbono orgânico evitando a sua degradação (Barré *et al.*, 2014; Calero *et al.*, 2022). Trabalhos como os de Churchman *et al.* (2020) também mostram o papel das argilas na retenção do carbono orgânico e que estes ficam mais retidos quando estão próximos à superfície dos minerais ou dentro dos microagregados além do fato de que onde houve adição de argilas em solos arenosos houve um aumento de carbono orgânico do solo (Churchman *et al.*, 2020).

As características físicas areia grossa, areia fina, argila e silte tiveram o valor dos teores bem próximos se comparados entre todas as classes conservadas e degradadas, com exceção da areia fina (12%) e silte (9%) na classe conservadas com ganho de verdor que apresentam os teores mais baixos e a argila que tem o maior teor (38%) também na mesma classe. As áreas conservadas com ganho de verdor nos indicam que os solos presentes nessas áreas possuem textura argilosa e que, por suas características influenciam na retenção de água, capacidade de troca catiônica e na fertilidade mesmo tendo caráter distrófico, baixo valor V%.

As áreas conservadas, em específico as áreas que têm aumento de verdor - conservadas com ganho de verdor, são as que tiveram os menores teores das variáveis pH em água, K, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, V%, CTC ef., CTC, P, areia fina e silte e em contraponto também são as áreas que tiveram os maiores teores de argila, areia grossa, Al<sup>3+</sup>, m%, SB em comparação às outras classes.

Nas áreas conservadas ocorre uma correlação significativa positiva da profundidade dos perfis de solos com os teores de Al<sup>3+</sup>, acidez potencial e saturação por alumínio, o que era esperado, indicando que à medida que os solos têm maior profundidade o teor destas variáveis também se faz presente. Estes resultados nos mostram que existe uma relação entre os solos mais profundos com o intemperismo, mesmo que de forma incipiente.

Ainda nas áreas conservadas também existe a correlação negativa da profundidade com as variáveis pH em água, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K, soma de base, saturação por base, saturação por sódio e P<sub>rem</sub>, indicando que, a medida que a profundidade do solo aumenta o teor dessas variáveis vai diminuindo e isto nos indica o que já foi verificado anteriormente a relação de baixo intemperismo com solos rasos e quimicamente ricos, assim como pode ser visto em outros trabalhos em regiões áridas (Zhao *et al.*, 2022; Santana *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2024).

As variáveis P, presente nos estágios *Status* e *Process*, K presente somente no estágio *Trend* e a variável  $\text{Ca}^{2+}$  presente nos três estágios, apresentam relação entre os parâmetros da vegetação e da fertilidade do solo (Ronquim, 2010; Menezes *et al.*, 2012; Pellegrini, 2016). Estas variáveis são elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas (Barré *et al.*, 2008; Ronquim, 2010). Os teores de P, K e  $\text{Ca}^{2+}$  são mais elevados nas áreas degradadas do que nas áreas conservadas, com destaque para a variável potássio que apresenta valores médios extremamente altos.

O fósforo (P) é um macronutriente e tem duas principais fontes naturais, mineral e orgânico, este vem da atividade biológica que decompõe a matéria orgânica e o outro, a partir do intemperismo químico dos minerais de apatita que liberam o fósforo para o sistema (Melo & Alleoni, 2019; Chen *et al.*, 2021; Islam *et al.*, 2024). A apatita é um mineral de fácil intemperização no solo e devido a possível formação de compostos insolúveis com alumínio, ferro e cálcio a disponibilidade do fósforo para as plantas é limitada (Melo & Alleoni, 2019; Islam *et al.*, 2024, Liu *et al.*, 2024).

Nas áreas com melhoria gradual na condição da vegetação esperava-se que tivesse mais atividade biológica já que são áreas que têm apresentado aumento de verdor, mas não é o que acontece. O teor de fósforo não é alto para estas áreas, então aparentemente a atividade biológica não é a principal fonte do fósforo para as áreas verdes.

As áreas que não são verdes, em *Process*, têm um teor elevado de fósforo,  $20 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas degradadas com perda de verdor,  $65 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas degradadas com ganho de verdor e  $241 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas degradadas estável. A fonte de fósforo dessas áreas pode ser o mineral apatita, que é a principal fonte mineral de fósforo. Já as áreas conservadas apresentam valores mais baixos de fósforo em relação às áreas degradadas sendo  $11 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas conservada com perda de verdor,  $2 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas conservadas com ganho de verdor e  $30 \text{ mg/dm}^3$  nas áreas conservadas estável. O que se vê em comum às áreas conservadas e degradadas em relação ao elemento fósforo é que em ambas as áreas estáveis ocorre o maior teor de P.

Aparentemente observamos uma distinção entre os solos derivados de material que tem apatita daqueles que não têm e tudo indica que os solos ter apatita reflete numa condição de degradadas por serem as áreas que apresentam os maiores teores de fósforo em relação às áreas conservadas.

O que provavelmente têm causado o aumento e a diminuição da quantidade de fósforo nesses ambientes é a atividade biológica e elevada acidez dos solos, já que nas áreas

conservadas tem-se os menores teores de fósforo e também são as áreas que possuem acidez mais elevada e de acordo com a literatura o fósforo fica mais disponível na faixa de pH entre 5,5 - 6,0 e a redução do pH diminui a disponibilidade do elemento assim como a atividade microbiana (Jahan *et al.*, 2025) o que coincide com os teores obtidos.

O fósforo tem apresentado alto teor porque o intemperismo é incipiente. Mesmo em solos da Caatinga, em uma área onde não se esperava encontrar solos com diferentes graus de intemperismo, ainda sim observamos um gradiente, solos mais lixiviados do que outros, solos mais intemperizados do que outros e aparentemente a cobertura vegetal mostra isso.

Alguns estudos mostram que é comum observar o aumento da presença do fósforo disponível e cátions trocáveis como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e K em áreas onde ocorrem a prática da queima de biomassa para o desmatamento (da Silva *et al.*, 2021), diferentemente do que ocorre nas florestas naturais. Essa correlação de aumento no teor de fósforo e cátions trocáveis é observado na classe conservada estável, e isso nos indica que, mesmo uma área que atualmente se encontra em um grau de conservação, o solo apresenta sinais de que em algum momento pode ter passado pelo mesmo processo.

As áreas onde tem cobertura vegetal mais densa o nível de intemperismo se mostrou um pouco mais avançado, mas aparentemente o suficiente para diferenciar uma área com mais verdor de outra com menos verdor.

Novamente as áreas conservadas com ganho de verdor se destacam apresentando baixo teor de K, inferior a 50 ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ), e as outras áreas possuem teores de K superiores a 100 ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ). Com exceção das áreas conservadas com ganho de verdor que possuem um valor extremamente baixo para  $\text{Ca}^{2+}$ , as demais áreas apresentam teores similares, assim como os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  que entre as seis classes são bem próximos. Os solos com elevada acidez nos mostram a relação direta com uma diminuição dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Chen *et al.*, 2021) como observado nas áreas conservadas que possuem menores teores que nas áreas degradadas.

Surpreendentemente as áreas que apresentaram ter maior verdor vegetal não são aquelas que apresentaram maior disponibilidade de nutrientes e maior fertilidade química, mas sim as que possuem menor fertilidade química.

## 5 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas foi possível observar que as áreas conservadas possuem menos solos férteis e mais solos ácidos, diferentemente do que esperaríamos de

áreas que não passam por um processo intenso de intemperismo. Os resultados apresentados, permitiram identificar que as classes de maior dominância são as classes conservadas, especificamente aquelas que apresentam tendência de aumento de verdor. As variáveis saturação por bases, soma de bases, acidez potencial e teor de alumínio mostraram ter maior ação favorável a perda de verdor.

Estes resultados indicam que, nas áreas que passam pelo processo de alteração de perda de verdor, o solo já apresenta uma predisposição natural ao processo de desertificação. Essa condição, somada às práticas inadequadas de manejo do solo, contribui para intensificação da desertificação. A busca por indicadores ambientais que explicam isoladamente a mudança no verdor não é suficiente para explicar os mecanismos por trás do aumento (*greening*) ou diminuição (*browning*) da vegetação. É fundamental que essa análise seja feita de forma integrada, pois, ao considerar as variáveis do solo de forma conjunta, é possível identificar a predisposição existente a essas alterações.

O presente estudo demonstra que a inclusão de dados mineralógicos e aqueles relacionados à água podem complementar estudos sobre desertificação em regiões semiáridas. Além disso, esta pesquisa evidenciou a presença de classes de solos além das representadas nos dados de órgãos oficiais, por ocorrerem de forma localizada. Entre essas classes estão os Cambissolos, Gleissolos, Plintossolos e Organossolos descritas nas áreas onde os perfis analisados foram classificados.

## REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, V. C., TORRES, F. S. de M., LIMA, E. de A. M., & SILVA, E. P. da. (2016). EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO ESTADO DA PARAÍBA. In F. S. de M. Torres & E. P. da Silva (Eds.), **Geodiversidade do estado da Paraíba - Programa Geologia do Brasil Levantamento da Geodiversidade**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- ALMEIDA-FILHO & CARVALHO. Mapping land degradation in the Gilbués region, northeastern Brazil, using Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 1087-1094, 2010.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., de MORAES GONÇALVES, J. L., & SPAROVEK, G. (2013). **Köppen's climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANDRADE, L. A. de, FABRICANTE, J. R., & OLIVEIRA, F. X. de. (2010). Impactos da invasão de *Prosopis juliflora* (sw.) DC. (Fabaceae) sobre o estrato arbustivo-arbóreo em áreas de Caatinga no Estado da Paraíba, Brasil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, 32(3). <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v32i3.4535>
- ARAUJO, A. S. F., de MEDEIROS, E. V., da COSTA, D. P., PEREIRA, A. P. de A., & MENDES, L. W. (2024). From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties. **Journal of Environmental Management**, 351, 119746. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746>
- ARAÚJO FILHO, J. C. de. (2017). Solos da Caatinga. In N. Curi, J. C. Ker, R. F. Novais, P. Vidal-Torrado, & C. E. G. R. Schaefer (Eds.), **Pedologia: Solos dos Biomas Brasileiros: Vol. Único** (1a, pp. 227–256). Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.
- ARAÚJO FILHO, J. C. de;, MARQUES, F. A. ;, AMARAL, A. J. do;, CUNHA, T. J. F. ; ., SOUZA JÚNIOR, V. S. de;, & GALVÃO, P. V. M. (2022). Solos do Semiárido: características e estoque de carbono. In **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas - Experiência brasileira** (pp. 93–112). EMBRAPA. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1150132/1/Solos-do-semiarido-2022.pdf>
- ARAÚJO SILVA, E. C., LEITE, J., ALVES, M. C. J. L., DOS SANTOS, C. M., DAIBES, L. F., FERNANDES-JÚNIOR, P. I., MOURA, F. de B. P., & VIEIRA SILVA, J. (2024). Nitrogen and phosphorus uptake dynamics in anthropized and conserved Caatinga dry forests. **Journal of Arid Environments**, 224, 105242. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105242>
- BARRÉ, P., VELDE, B., FONTAINE, C., CATEL, N., & ABBADIE, L. (2008). Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. **Geoderma**, 146 (1–2), 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.022>
- BARRÉ, P., FERNANDEZ-UGALDE, O., VIRTO, I., VELDE, B., & CHENU, C. (2014). Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete

knowledge and exciting prospects. **Geoderma**, 235–236, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.029>

BENTI CHALCHISSA, F., & KURIS, B. K. (2024). Modeling the impacts of extreme climate scenarios on soil acidity (pH and exchangeable aluminum) in Abbay River Basin, Ethiopia. **Heliyon**, 10(12), e33448. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33448>

BRASIL, M. M. A. (2005). MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Secretaria de Recursos Hídricos Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil**. <http://desertificacao.cnrh-srh.gov.br>

BRASIL, & CPRM. (2002). Mapa Geológico do Estado da Paraíba. In **GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DA PARAÍBA**. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL.

BREIMAN, L. (2001). Random forests. Machine learning. **Machine Learning**, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

CALERO, J., GARCÍA-RUIZ, R., TORRÚS-CASTILLO, M., VICENTE-VICENTE, J., & MARTÍN-GARCÍA, J. (2022). Role of Clay Mineralogy in the Stabilization of Soil Organic Carbon in Olive Groves under Contrasted Soil Management. **Minerals**, 13(1), 60. <https://doi.org/10.3390/min13010060>

CARVALHO, J. W., PINHEIRO, H., BARBOSA, T. (2020). **Pedometria e Mapeamento Digital: Contribuições na classificação e mapeamento de solos**. Atena Editora, 43-60. <https://doi.org/10.22533/at.ed.7512011125>

CASTRO OLIVEIRA, G., FRANCELINO, M. R., Arruda, D. M., FERNANDES-FILHO, E. I., & SCHAEFER, C. E. G. R. (2019). Climate and soils at the Brazilian semiarid and the forest-Caatinga problem: new insights and implications for conservation. **Environmental Research Letters**, 14(10), 104007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3d7b>

CATTELL, R. B. (1966). The Scree Test For The Number Of Factors. **Multivariate Behavioral Research**, 1(2), 245–276. [https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102\\_10](https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). (2016). **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**.

CHEN, S., CADE-MENUN, B. J., BAINARD, L. D., st. LUCE, M., HU, Y., & CHEN, Q. (2021). The influence of long-term N and P fertilization on soil P forms and cycling in a wheat/fallow cropping system. **Geoderma**, 404, 115274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115274>

CHURCHMAN, G. J., SINGH, M., SCHAPPEL, A., SARKAR, B., & BOLAN, N. (2020). Clay Minerals as the Key to the Sequestration of Carbon in Soils. **Clays and Clay Minerals**, 68 (2), 135–143. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00071-z>

DA SILVA, T. G. F., DE QUEIROZ, M. G., ZOLNIER, S., DE SOUZA, L. S. B., DE SOUZA, C. A. A., de MOURA, M. S. B., de ARAÚJO, G. G. L., STEIDLE NETO, A. J., dos SANTOS, T. S., de MELO, A. L., da CRUZ NETO, J. F., da SILVA, M. J., & ALVES, H. K. M. N. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the

Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. **Soil and Tillage Research**, 207, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852>

DE SOUZA, J. J. L. L., DE SOUZA, B. I., XAVIER, R. A., Pacheco, A. A., PESSEDA, L. C. R., & dos SANTOS BRITO, E. (2020). Archaeoanthrosol formation in the Brazilian semiarid. **CATENA**, 193, 104603. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104603>

DE SOUZA, J. J. L. L., SOUZA, B. I., XAVIER, R. A., CARDOSO, E. C. M., de MEDEIROS, J. R., da FONSECA, C. F., & SCHAEFER, C. E. G. R. (2022). Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **CATENA**, 212, 106101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106101>

DE SOUZA MEDEIROS, A., GONZAGA, G. B. M., DA SILVA, T. S., DE SOUZA BARRETO, B., DOS SANTOS, T. C., de MELO, P. L. A., de ARAÚJO GOMES, T. C., & MAIA, S. M. F. (2023). Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, 33, e00647. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647>

DRESCHER, M. S., KAISER, D. R., Lima, C. L. R. de, & BRAIDA, J. A. (2023). Compactação do solo. In J. A. Albuquerque & P. I. Gubiani (Eds.), *Física do Solo* (1ª, pp. 145–178). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul.

ERNANI, P. R., ALMEIDA, J. A. de, & SANTOS, F. C. dos. (2007). Potássio. In R. F. Novais, V. Alvarez, v. H, N. F. Barros, R. L. F. Fonte, R. B. Cantarutti, & J. C. L. Neves (Eds.), **Fertilidade do Solo: Vol. Único** (pp. 551–589). SBCS.

FEIFEL, M., DURNER, W., HOHENBRINK, T. L., & PETERS, A. (2024). Effects of improved water retention by increased soil organic matter on the water balance of arable soils: A numerical analysis. **Vadose Zone Journal**, 23(1). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20302>

FENG, W., PLANTE, A. F., & SIX, J. (2013). Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. **Biogeochemistry**, 112(1–3), 81–93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>

FRANCISCO, P. R. M., SANTOS, D., & LIMA, E. R. de. (2017). **Potencial Pedológico das Terras do Estado da Paraíba para as Principais Culturas Agrícolas** (1a).

GIARDINA, C. P., RYAN, M. G., HUBBARD, R. M., & BINKLEY, D. (2001). Tree Species and Soil Textural Controls on Carbon and Nitrogen Mineralization Rates. **Soil Science Society of America Journal**, 65(4), 1272–1279. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541272x>

GLASER, B. (2007). Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 362(1478), 187–196. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1978>

GUBIANI, P. I., & REINERT, D. J. (2023). Energia térmica do solo. In J. A. Albuquerque & P. I. Gubiani (Eds.), **Física do solo: Vol. Único** (1a, pp. 195–219). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul.

GUGLIELMI, G. (2022). Climate change is turning more of Central Asia into desert. **Nature**. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01667-2>

GUO, B.-X., ZHOU, J., ZHAN, L.-Q., WANG, Z.-Y., WU, W., & LIU, H.-B. (2024). Spatial and Temporal Variability of Soil pH, Organic Matter and Available Nutrients (N, P and K) in Southwestern China. **Agronomy**, *14*(8), 1796. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081796>

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., & TATHAM, R. L. (2009). **Análise Multivariada de Dados** (6a ed). Bookman.

HOFFLAND, E., KUYPER, T. W., COMANS, R. N. J., & CREAMER, R. E. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. **Plant and Soil**, *455*(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>

IBGE (2004). Mapa de Vegetação do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística ([ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf))

IBGE (2022). **Semiárido Brasileiro**. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=o-que-e>

IMESON, A. C., & PRINSEN, H. A. M. (2004). Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, *104*(2), 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.033>

INSA (2019). **Instituto Nacional do Semiárido**. <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro>

INSA (2024). **Delimitação do Semiárido Brasileiro (2024)**. <https://www.gov.br/insa/pt-br/centrais-de-conteudo/mapas/mapas-em-pdf/delimitacao-do-semiarido-brasileiro-2024.pdf/view>

ISLAM, M., SIDDIQUE, K. H. M., PADHYE, L. P., PANG, J., SOLAIMAN, Z. M., HOU, D., SRINIVASARAO, C., ZHANG, T., CHANDANA, P., VENU, N., PRASAD, J. V. N. S., SRINIVAS, T., SINGH, R., KIRKHAM, M. B., & BOLAN, N. (2024). **A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves** (pp. 153–249). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>

JAHAN, N., MAHMUD, U., & KHAN, Md. Z. (2025). Sustainable plant-soil phosphorus management in agricultural systems: challenges, environmental impacts and innovative solutions. **Discover Soil**, *2*(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00039-2>

KAISER, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educational and Psychological Measurement**, *20*(1), 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

- KAISER, D. R. & SILVA V. R. da (2023). Água no solo. In J. A. Albuquerque & P. I. Gubiani (Eds.), **Física do solo: Vol. Único** (1a, pp. 221–276). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul.
- KÄMPF, N., Curi, N., RESENDE, M., KER, J. C., FONTES, M. P. F., ARAÚJO FILHO, J. C., Ribeiro, M. R., Oliveira, L. B. de, & Oliveira, J. B. de. (2015). **Pedologia Fundamentos: Vol. Único** (J. C. Ker, N. Curi, C. E. G. R. Schaefer, & P. Vidal-Torrado, Eds.; 1a). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- KASRAEI, B., SCHMIDT, M. G., ZHANG, J., BULMER, C. E., FILATOW, D. S., ARBOR, A., PENNELL, T., & HEUNG, B. (2024). A framework for optimizing environmental covariates to support model interpretability in digital soil mapping. *Geoderma*, 445, 116873. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116873>
- KUHN, M. (2019). **20 Recursive Feature Elimination** | The caret Package.
- KUHN, M. (2021). Caret: Classification and regression Training. In **Handbook of Neural Computation**. IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1887/0750303123/b365c43>
- KUHN, M. et al. (2023). The caret package. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. <https://cran.r-project.org/package=caret>.
- LEMOS, J. E. de, SOUZA, B. I. de, & DINIZ MARCO T. M. (2020, April). Sistemas, Caos e o Processo de Desertificação no Semiárido Brasileiro\_BartolomeuIsrael. **Ateliê Geográfico**, v. 14, n. 01, 136–154. <https://doi.org/10.5216/ag.v14i1.57004>
- LIAW, Andy; WIENER, Matthew (2002). **Classification and regression by randomForest**. R news, v. 2, n. 3, p. 18-22.
- LIMA, H. N. de B., COELHO, J. J., DUBEUX JÚNIOR, J. C. B., SANTOS, E. R. da S., CUNHA, M. V. da, MELLO, A. C. L. de, & SANTOS, M. V. F. dos. (2020). SOIL CHEMICAL CHANGES AND RESEMBLANCES IN A CHRONOSEQUENCE RAINFOREST-SUGARCANE-PASTURELAND IN THE ATLANTIC FOREST BIOME. *CERNE*, 26(4), 444–455. <https://doi.org/10.1590/01047760202026042745>
- LIN, L. I.-K. (1989). A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45(1), 255. doi:10.2307/2532051
- LIU, X., ZHANG, Y., WANG, Z., & CHEN, Z. (2024). The contribution of organic and chemical fertilizers on the pools and availability of phosphorus in agricultural soils based on a meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 156, 127144. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127144>
- LUCAS-BORJA, M. E., PLAZA-ALVAREZ, P. A., XU, X., CARRA, B. G., & ZEMA, D. A. (2023). Exploring the factors influencing the hydrological response of soil after low and high-severity fires with post-fire mulching in Mediterranean forests. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(1), 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.08.002>
- MACEDO, R. S., BEIRIGO, R. M., MEDEIROS, B. M., FELIX, V. J. L., SOUZA, R. F. da S., & BAKKER, A. P. de. (2021). PROCESSOS PEDOGENÉTICOS E SUSCEPTIBILIDADE DOS SOLOS À DEGRADAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. *Caminhos de Geografia*, 22(81), 176–195. <https://doi.org/10.14393/RCG228155397>

- MACIEL, M. G. R., RAMOS, M. B., de SOUZA, S. M., da CUNHA, S. S., de FARIA LOPES, S., & de SOUZA, J. J. L. L. (2024). Water and nutrients mediate tree communities in the driest region of Caatinga. **CATENA**, 242, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108107>
- MARQUES, F. A., NASCIMENTO, A. F. do, ARAÚJO FILHO, J. C., & SILVA, A. B. da. (2014). **Solos do Nordeste**. EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003864/solos-do-nordeste>
- MCBRATNEY, A. B., MENDONÇA SANTOS, M. L., & MINASNY, B. (2003). On digital soil mapping. **Geoderma**, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- MELO, V. de F., & ALLEONI, L. R. F. (Orgs). (2019). **Química e Mineralogia do Solo - Conceitos Básicos e Aplicações** (R. F. Novais & R. B. Cantarutti, Eds.; 3ª). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- MELLO, Ivan Sergio de Cavalcanti. Atlas de matérias-primas minerais cerâmicas do nordeste brasileiro / Ivan Sergio de Cavalcanti Mello, José Francisco Marciano Motta, Marcelo Soares Bezerra, Julio de Rezende Nesi, Roberto Loreti Junior. – São Paulo : CPRM, 2011. p. 19-75, il. ISBN: 978-85-7499-124-5. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15544>
- MENEZES, R., SAMPAIO, E., GIONGO, V., & PÉREZ-MARIN, A. (2012). Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, 72(3 suppl), 643–653. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>
- MIRZABAEV, A. , J., WU, J., EVANS, F., GARCÍA-OLIVA, I. H. M. I. J., KIMUTAI, T., KNOWLES, F., MEZA, D., NEDJRAOUI, F., TENA, M., & TÜRKEŞ, R. V. M. (2019). *Desertification*. In: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-3/>
- MORELL, O., & FRIED, R. (2009). On Nonparametric Tests for Trend Detection in Seasonal Time Series. In **Statistical Inference, Econometric Analysis and Matrix Algebra** (pp. 19–39). Physica-Verlag HD. [https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2121-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2121-5_2)
- MOUSAVI, S. R., SARMADIAN, F., ANGELINI, M. E., BOGAERT, P., & OMID, M. (2023). Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. **CATENA**, 232, 107392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107392>
- NASCIMENTO, C. M., DEMATTÊ, J. A. M., MELLO, F. A. O., ROSAS, J. T. F., TAYEBI, M., BELLINASSO, H., GRESCHUK, L. T., ALBARRACÍN, H. S. R., & OSTOVARI, Y. (2022). Soil degradation detected by temporal satellite image in São Paulo state, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 120, 104036. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104036>

PARAÍBA. Governo (1997). **História da Paraíba**. Disponível em: <[http://www.pm.pb.gov.br/arquivos/Historia\\_da\\_Paraiba.pdf](http://www.pm.pb.gov.br/arquivos/Historia_da_Paraiba.pdf)>. Acesso em: mar. 2024.

PELLEGRINI, A. F. A. (2016). Nutrient limitation in tropical savannas across multiple scales and mechanisms. **Ecology**, *97*(2), 313–324. <https://doi.org/10.1890/15-0869.1>

PEREIRA, L. F., FERNANDES-FILHO, E. I., GOMES, L. C., ARRUDA, D. M., OLIVEIRA, G. C., SCHAEFER, C. E. G. R., de SOUZA, J. J. L. L., & FRANCELINO, M. R. (2024). Soil and vegetation types are predisposition factors controlling greenness changes: A shift of paradigm in greening and browning modelling? **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, *36*, 101366. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101366>

PEREIRA, L.F., MOQUEDACE, C.M., ROSOLEM, G.P.N., DE SOUSA, M.d.C., FRANCELINO, M.R., FERNANDES-FILHO, E.I. (2024). Applying Machine Learning Techniques to Model and Map Soil Surface Texture Using Limited Legacy Data. In: de Carvalho Junior, W., Saraiva Koenow Pinheiro, H., Bacis Ceddia, M., Souza Valladares, G. (eds) **Pedometrics in Brazil**. Progress in Soil Science. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-64579-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-64579-2_3).

PEREZ-MARIN, A. M., CAVALCANTE, A. de M. B., MEDEIROS, S. S. de, TINÔCO, L. B. de M., & SALCEDO, I. H. (2012). Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: Ocorrência natural ou antrópica? **Revista Parcerias Estratégicas**, 87–106. [https://www.researchgate.net/publication/309546679\\_Nucleos\\_de\\_desertificacao\\_no\\_semiarido\\_brasileiro\\_Ocorrencia\\_natural\\_ou\\_antropica](https://www.researchgate.net/publication/309546679_Nucleos_de_desertificacao_no_semiarido_brasileiro_Ocorrencia_natural_ou_antropica)

R Core Team. (2020). **R: a language and environment for statistical computing**.

RAMÍREZ, P. B., MACHADO, S., SINGH, S., PLUNKETT, R., & CALDERÓN, F. J. (2023). Addressing the effects of soil organic carbon on water retention in US Pacific Northwest wheat–soil systems. **Frontiers in Soil Science**, *3*. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1233886>

RAMOS, M. B., MACIEL, M. G. R., CUNHA, S. S. da, DE SOUZA, S. M., PEDROSA, K. M., DE SOUZA, J. J. L. L., GONZÁLEZ, E. J., MEAVE, J. A., & LOPES, S. de F. (2023). The role of chronic anthropogenic disturbances in plant community assembly along a water availability gradient in Brazil's semiarid Caatinga region. **Forest Ecology and Management**, *538*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120980>

RAWAL, A., CHAKRABORTY, S., LI, B., LEWIS, K., GODOY, M., PAULETTE, L., & WEINDORF, D. C. (2019). Determination of base saturation percentage in agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometer. **Geoderma**, *338*, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.032>

RAWLS, W. J., PACHEPSKY, Y. A., RITCHIE, J. C., SOBECKI, T. M., & BLOODWORTH, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, *116*(1–2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

REFATI, D. C., SILVA, J. L. B. da, MACEDO, R. S., LIMA, R. da C. C., SILVA, M. V. da, PANDORFI, H., SILVA, P. C., & OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de. (2023). Influence of drought and anthropogenic pressures on land use and land cover change in the brazilian semiarid region. **Journal of South American Earth Sciences**, *126*, 104362. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104362>

RIBEIRO, E. M. S., ARROYO-RODRÍGUEZ, V., SANTOS, B. A., TABARELLI, M., & LEAL, I. R. (2015). Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, *52*(3), 611–620. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12420>Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, *36*(8), 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047

RODRÍGUEZ-ALBARRACÍN, H. S., DEMATTÊ, J. A. M., ROSIN, N. A., CONTRERAS, A. E. D., SILVERO, N. E. Q., CERRI, C. E. P., MENDES, W. de S., & TAYEBI, M. (2023). Potential of soil minerals to sequester soil organic carbon. **Geoderma**, *436*, 116549. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116549>

RONQUIM, C. C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais . In *Embrapa Monitoramento por Satélite* (Issues 1806–3322, pp. 1–30).  
Shabou, M., Mougenot, B., Chabaane, Z., Walter, C., Boulet, G., Aissa, N., & Zribi, M. (2015). Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands. **Remote Sensing**, *7*(5), 6059–6078. <https://doi.org/10.3390/rs70506059>

SANTANA, M. da S., ANDRADE, E. M. de, SAMPAIO, E. V. de S. B., FERREIRA, T. O., SALVIANO, A. M., SILVA, D. J. da, CUNHA, T. J. F., & GIONGO, V. (2022). Do agrosystems change soil carbon and nutrient stocks in a semiarid environment? **Journal of Arid Environments**, *201*, 104747. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104747>

SANTOS, W. R. dos, JARDIM, A. M. da R. F., SOUZA, C. A. A. de, SOUZA, L. S. B. de, SILVA, G. Í. N. da, MORAIS, J. E. F. de, da SILVA, M. J., ALVES, C. P., MONTENEGRO, A. A. de A., & SILVA, T. G. F. da. (2024). Carbon and nutrient dynamics in landscapes under different levels of anthropogenic intervention in the semi-arid region of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, *368*, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109020>

SAVITZKY, ABRAHAM., & GOLAY, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. **Analytical Chemistry**, *36*(8), p. 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>

SCHAEFER, C. E. G. R. (2013). Bases físicas da paisagem brasileira: estrutura geológica, relevo e solos. **Tópicos em Ciência do Solo** A Araújo; & B Alves, Eds. (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo), p. 1-69.

SHAHRIARI, A., KHORMALI, F., KEHL, M., AYOUBI, S., WELP, G. (2011). Effect of a long-term cultivation and crop rotations on organic carbon in loess derived soils of Golestan Province, Northern Iran. **International Journal of Plant Production**. *5*. p. 147-152.

- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 275-374
- SILVA, L. F. da, DE SOUZA, B. I., & CÂMARA ARTIGAS, R. (2022). Identification of desertified and preserved areas in a conservation unit in the state of Paraíba – Brazil. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, 48(1), 59–78. <https://doi.org/10.18172/cig.5098>
- SINGH, M., SARKAR, B., SARKAR, S., CHURCHMAN, J., BOLAN, N., MANDAL, S., MENON, M., PURAKAYASTHA, T. J., & BEERLING, D. J. (2018). **Stabilization of Soil Organic Carbon as Influenced by Clay Mineralogy** (pp. 33–84). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>
- SOUZA, B. I., & TRAVASSOS, I. S. (2011). Cadernos do Logepa v. **LOGEPA**, 6(2), 101–114. [www.geociencias.ufpb.br/cadernosdologepa](http://www.geociencias.ufpb.br/cadernosdologepa)
- SOUZA, B. I. de, ARTIGAS, R. C., & LIMA, E. R. V. de. (2015). CAATINGA E DESERTIFICAÇÃO the Caatinga and desertification. **Mercator**, 14(1984–2201), 131–150. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1401.0009>
- SOUZA, B. I. de, MACÊDO, M. L. A., & SILVA, G. J. F. (2016). TEMPERATURA DOS SOLOS E SUAS INFLUÊNCIAS NA REGENERAÇÃO NATURAL DA CAATINGA NOS CARIRIS VELHOS – PB. **Raega - O Espaço Geográfico Em Análise**, 35, 261. <https://doi.org/10.5380/raega.v35i0.41609>
- SOUZA, B. I. de, & MARTINS, V. L. (2012). INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM SOLOS DE ZONA SEMIÁRIDA E SUA RELAÇÃO COM OS PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO. **Boletim Gaúcho de Geografia**, 39, 25–40.
- SOUZA, B. I. de, SUERTEGARAY, D. M. A., & LIMA, E. R. V. de. (2009). DESERTIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO E SOLOS DO CARIRI PARAIBANO. **Mercator**, 8(16), 217–232. <https://doi.org/10.4215/RM2009.0816.0017>
- SOUZA, B. I. de, SUERTEGARAY, D. M. A., & LIMA, E. R. V. de. (2011). **Evolução da desertificação no Cariri paraibano a partir da análise das modificações na vegetação** (Vol. 36, Issue 1). <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/4914/5143>
- SOUZA, H. A. de, LEITE, L. F. C. ; & MEDEIROS, J. C. (2021). MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS NO NORDESTE BRASILEIRO. In **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1133396/solos-sustentaveis-para-a-agricultura-no-nordeste>
- TONON, G., SOHI, S., FRANCIOSO, O., FERRARI, E., MONTECCHIO, D., GIOACCHINI, P., CIAVATTA, C., PANZACCHI, P., & POWLSON, D. (2010). Effect of soil pH on the chemical composition of organic matter in physically separated soil fractions in two broadleaf woodland sites at Rothamsted, UK. **European Journal of Soil Science**, 61(6), 970–979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01310.x>
- VIEIRA, R. M. S. P., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R. C. S., SESTINI, M. F., AFFONSO, A. G., RODRIGUEZ, D. A., BARBOSA, A. A., CUNHA, A. P. M. A., VALLES, G. F.,

CREPANI, E., de OLIVEIRA, S. B. P., de SOUZA, M. S. B., Calil, P. M., de CARVALHO, M. A., VALERIANO, D. M., CAMPELLO, F. C. B., & SANTANA, M. O. (2015). Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, *6*(1), 347–360. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>

WANG, J., ZHEN, J., HU, W., CHEN, S., LIZAGA, I., ZERAATPISHEH, M., & YANG, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. **International Soil and Water Conservation Research**, *11*(3), 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>

ZHAO, Y., ZHAO, M., QI, L., ZHAO, C., ZHANG, W., ZHANG, Y., WEN, W., & YUAN, J. (2022). Coupled Relationship between Soil Physicochemical Properties and Plant Diversity in the Process of Vegetation Restoration. **Forests**, *13*(5), 648. <https://doi.org/10.3390/f13050648>

ZHANG, J., QU, X., SONG, X., XIAO, Y., WANG, A., & LI, D. (2023). Spatial Variation in Soil Base Saturation and Exchangeable Cations in Tropical and Subtropical China. **Agronomy**, *13* (3), 781. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030781>

ZHANG, Y., GUO, L., CHEN, Y., SHI, T., LUO, M., JU, Q., ZHANG, H., & WANG, S. (2019). Prediction of Soil Organic Carbon based on Landsat 8 Monthly NDVI Data for the Jiangnan Plain in Hubei Province, China. **Remote Sensing**, *11*(14), 1683. <https://doi.org/10.3390/rs11141683>

## ANEXOS

Anexo 1 - Porcentagem das classes *stable*, *browning* e *greening* em tendência e percentual de cada classe na PCA de tendência do verdor em cada quadrante.

Trend	Nº de perfis	Porcentagem (%)
Stable	70	76.08
Browning	13	14.13
Greening	9	9.78

Quadrante	Trend	Porcentagem (%)
I	Stable	66.66
I	Browning	22.22
I	Greening	11.11
II	Stable	68.18
II	Greening	27.27
II	Browning	4.54
III	Stable	65.0
III	Browning	30.0
III	Greening	5.0
IV	Stable	93.75
IV	Browning	6.25

Quadrante I = Quadrante Superior Direito; Quadrante II = Quadrante Superior Esquerdo; Quadrante III = Quadrante Inferior Esquerdo e Quadrante IV = Quadrante Inferior Direito em cada PCA.

Anexo 2 - Porcentagem das classes *brown* e *green* no estado atual e percentual de cada classe na PCA do estado atual do verdor em cada quadrante.

Status	Nº de perfis	Porcentagem (%)
Brown	64	69.57
Green	28	30.43

Quadrante	Status	Porcentagem (%)
I	Brown	77.77
I	Green	22.22
II	Green	72.72
II	Brown	27.27
III	Brown	65.0
III	Green	35.0
IV	Brown	96.87
IV	Green	3.12

Quadrante I = Quadrante Superior Direito; Quadrante II = Quadrante Superior Esquerdo; Quadrante III = Quadrante Inferior Esquerdo e Quadrante IV = Quadrante Inferior Direito em cada PCA.

Anexo 3 - Porcentagem dos processos para as seis classes e percentual de cada uma na PCA de processos em cada quadrante.

Process	Nº de pontos	Porcentagem (%)
Brown, Stable	51	55.43
Green, Stable	19	20.65
Brown, Browning	9	9.78
Green, Greening	5	5.43
Brown, Greening	4	4.35
Green, Browning	4	4.35

Quadrante	Process	Porcentagem (%)
I	Brown, Stable	50.0
I	Brown, Browning	16.66
I	Green, Stable	16.66
I	Brown, Greening	11.11
I	Green, Browning	5.55
II	Green, Stable	50.0
II	Brown, Stable	18.18
II	Green, Greening	18.18
II	Brown, Greening	9.09
II	Green, Browning	4.54

Quadrante	Process	Porcentagem (%)
III	Brown, Stable	45.0
III	Brown, Browning	20.0
III	Green, Stable	20.0
III	Green, Browning	10.0
III	Green, Greening	5.0
IV	Brown, Stable	90.62
IV	Brown, Browning	6.25
IV	Green, Stable	3.12

Quadrante I = Quadrante Superior Direito; Quadrante II = Quadrante Superior Esquerdo; Quadrante III = Quadrante Inferior Esquerdo e Quadrante IV = Quadrante Inferior Direito em cada PCA.