

Matéria orgânica do solo e índices de vegetação em uma área preservada do semiárido brasileiro

Soil organic matter and vegetation indices in a semi-arid preserved area of Brazil

Marcela da Cruz Cardoso¹; Adriana Oliveira Araújo²; Wemerson Leonardo Cruz da Silva³; Erickson Melo de Albuquerque⁴; João Abílio Diniz⁵; Anne Cristine Fortes da Silva⁶

¹ Universidade Federal da Paraíba, DSER, Areia/PB, Brasil. Email: mc2761099@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3327-1405>

² Instituto Federal da Paraíba, Campus Princesa Isabel, Princesa Isabel/PB, Brasil. Email: adriana.araujo@ifpb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3372-5668>

³ Universidade Federal da Paraíba, DSER, Areia/PB, Brasil. Email: wemersonleonardo39@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2069-9555>

⁴ Instituto Federal da Paraíba, Campus Princesa Isabel, Princesa Isabel/PB, Brasil. Email: erickson.albuquerque@ifpb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8711-4195>

⁵ Instituto Federal da Paraíba, Campus Princesa Isabel, Princesa Isabel/PB, Brasil. Email: joao.diniz@ifpb.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4112-2093>

⁶ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró/RN, Brasil. Email: ane.fortes@ufersa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8757-284>

Resumo: As áreas preservadas desempenham papel essencial na manutenção da resiliência dos ecossistemas e na dinâmica do carbono, especialmente em regiões semiáridas. Neste estudo, quantificamos a matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes profundidades, examinamos sua relação com o pH e avaliamos a cobertura vegetal utilizando os índices NDVI e CO₂Flux em uma área preservada no município de Princesa Isabel, Paraíba, Brasil. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–10 e 10–20 cm e analisadas quanto à MOS e ao pH, enquanto imagens do satélite Sentinel-2 foram processadas na plataforma Google Earth Engine. Concentrações mais elevadas de MOS foram observadas na camada superficial, refletindo o aporte de serrapilheira e a atividade biológica. Uma correlação positiva significativa com o pH ($r = 0,87$) indicou maior disponibilidade de nutrientes. Os índices de vegetação revelaram cobertura densa do dossel (NDVI de até 0,78) e expressivo potencial de sequestro de carbono (CO₂Flux de até –0,31). Esses resultados demonstram que a integração de análises laboratoriais e sensoriamento remoto constitui uma ferramenta robusta para o monitoramento das interações solo-vegetação, ressaltando o papel estratégico das áreas preservadas na promoção da resiliência ecológica e na mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Cobertura vegetal; Fertilidade do solo; Sensoriamento remoto.

Abstract: Preserved areas play a critical role in sustaining ecosystem resilience and carbon dynamics, particularly in semi-arid regions. Here, we quantified soil organic matter (SOM) at different depths, examined its relationship with soil pH, and assessed vegetation cover using NDVI and CO₂Flux indices in a preserved area of Princesa Isabel, Paraíba, Brazil. Soil samples were collected at 0–10 and 10–20 cm and analyzed for SOM and pH, while Sentinel-2 imagery was processed on the Google Earth Engine platform. Higher SOM concentrations were observed in the surface layer, reflecting litter input and biological activity. A significant positive correlation with pH ($r = 0.87$) indicated enhanced nutrient availability. Vegetation indices revealed dense canopy cover (NDVI up to 0.78) and substantial carbon sequestration potential (CO₂Flux down to –0.31). These findings demonstrate that combining laboratory analyses with remote sensing provides a robust approach for monitoring soil-vegetation interactions, highlighting the strategic role of preserved areas in enhancing ecological resilience and contributing to climate change mitigation.

Keywords: Vegetation cover; Soil fertility; Remote sensing.

Recebido: 13/09/2025; Aceito: 12/04/2026; Publicado: 14/05/2026.

1. Introdução

Os solos são um sistema não homogêneo, que possuem processos e mecanismos considerados complexos, principalmente quando se trata de solos originados em locais com alta variabilidade de características ambientais, como os solos do semiárido brasileiro. Diante disso, muitas técnicas de análises de solo convencionais são usadas para estabelecer a relação entre propriedades físicas e químicas do solo, porém muitas vezes desconsiderando suas complexas interações de múltiplos componentes (Silva, 2020).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente essencial para a sustentabilidade agrícola, especialmente em regiões de clima semiárido, pois desempenha papéis críticos na melhoria da fertilidade do solo, no aumento da capacidade de retenção de água e na promoção da biodiversidade do solo, tornando-se fundamental em práticas agrícolas sustentáveis (Okolo *et al.*, 2020). Mas nas condições do semiárido brasileiro, caracterizado por altas temperaturas, baixa pluviosidade e baixa produção de biomassa, o acúmulo de MOS é limitado, mesmo em condições naturais (Santos *et al.*, 2019), por isso, o equilíbrio torna-se tão importante.

A quantificação da MOS é relevante devido à sua influência direta na fertilidade do solo. Ela melhora a retenção de água, aprimora a estrutura do solo, aumenta a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas e estimula a atividade biológica, fatores que juntos contribuem significativamente para a qualidade e produtividade agrícola (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

Nas aplicações de sensoriamento remoto, os cientistas desenvolveram os índices de vegetação para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando os dados digitais de reflectância espectral da radiação eletromagnética. Os índices de vegetação são obtidos das várias combinações matemáticas das reflectâncias em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética (Liu, 2006).

Por sua vez, as Áreas Preservadas (AP) são cruciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, como a proteção dos recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e o controle da destruição ambiental. Além disso, as AP funcionam como áreas de refúgio para a vegetação nativa, o que pode potencializar o sequestro de carbono.

A integração de atributos químicos do solo especificamente matéria orgânica do solo (MOS) e pH — com índices orbitais de vegetação (NDVI e CO₂Flux) é fundamentada na cadeia de processos biogeoquímicos que conecta a qualidade química do solo ao desempenho funcional da vegetação. A MOS constitui reservatório central de nutrientes e fonte primária de carbono para a biota do solo, regulando diretamente a disponibilidade de nitrogênio, fósforo e micronutrientes essenciais ao crescimento vegetal. O pH, por sua vez, atua como controlador da solubilidade e biodisponibilidade de elementos como manganês, ferro e alumínio, determinando o ambiente químico no qual as raízes operam (Araujo Filho *et al.*, 2022). Essas condições químicas traduzem-se em respostas fisiológicas das plantas, ou seja, variações na taxa fotossintética, na biomassa foliar e no teor de clorofila, propriedades biofísicas precisamente captadas pelo NDVI por meio da reflectância no infravermelho próximo e no vermelho. No contexto da Caatinga, submetida a déficit hídrico sazonal severo, a disponibilidade de nutrientes mediada pelo pH e pela MOS torna-se fator limitante crítico para a atividade fotossintética, de modo que solos com maior teor de MOS e pH próximo à neutralidade tendem a sustentar vegetação com maior vigor, refletido em valores mais elevados de NDVI e em fluxos de CO₂ consistentes com maior produtividade primária líquida (Mendes *et al.*, 2020, 2021).

Neste contexto, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como a avaliação de índices espectrais de vegetação, tem se destacado como uma ferramenta eficiente para o monitoramento ambiental. Esses índices permitem uma análise precisa da cobertura vegetal e das condições das áreas de preservação, oferecendo informações valiosas sobre o estado de conservação de Áreas Preservadas e a relação entre a vegetação e a dinâmica do carbono. As ferramentas de sensoriamento remoto possibilitam a caracterização de áreas naturais ou manejadas, podendo ser utilizada também para extrapolar relações específicas, dependendo da consistência e estabilidade da estrutura do ecossistema (Guerini Filho *et al.*, 2020).

Assim, este estudo teve como objetivo geral quantificar o teor de matéria orgânica do solo pelo método da calcinação (*Loss of Ignition*) e aplicar os índices de vegetação: Índice por Diferença Normalizada (NDVI) e CO₂Flux na caracterização da cobertura vegetativa em uma Área Preservada no município de Princesa Isabel, Paraíba e como objetivos específicos: 1) Analisar o teor de matéria orgânica do solo em diferentes profundidades; 2) Verificar a influência do potencial hidrogeniônico (pH) do solo na sua disponibilidade de nutrientes; 3) Analisar a cobertura vegetal do solo, através do uso de geotecnologias e técnicas do sensoriamento remoto.

2. Metodologia

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no Centro de Capacitação Agrocomunitário (Figura 1), situado na BR 426, em Princesa Isabel, PB, nas coordenadas geográficas $7^{\circ}41'48''S$ e $37^{\circ}55'04''W$, próximo ao Açude dos Jerônimos. A instituição, administrada pelas Irmãs Missionárias Carmelitas, oferece uma variedade de atividades voltadas para o desenvolvimento social, ambiental e educativo, tanto para a comunidade local quanto para visitantes. Entre as iniciativas destacam-se as trilhas ecológicas, que promovem o contato com a natureza e o aprendizado sobre a biodiversidade local, além de intercâmbios com escolas de ensino fundamental, médio e superior, que favorecem o compartilhamento de experiências educacionais. O centro também funciona como um espaço de convivência, oferecendo ambientes adequados para recreação e para a realização de encontros formativos, que podem ter caráter religioso, com atividades voltadas à espiritualidade, ou social, buscando promover a integração e fortalecer os laços comunitários.

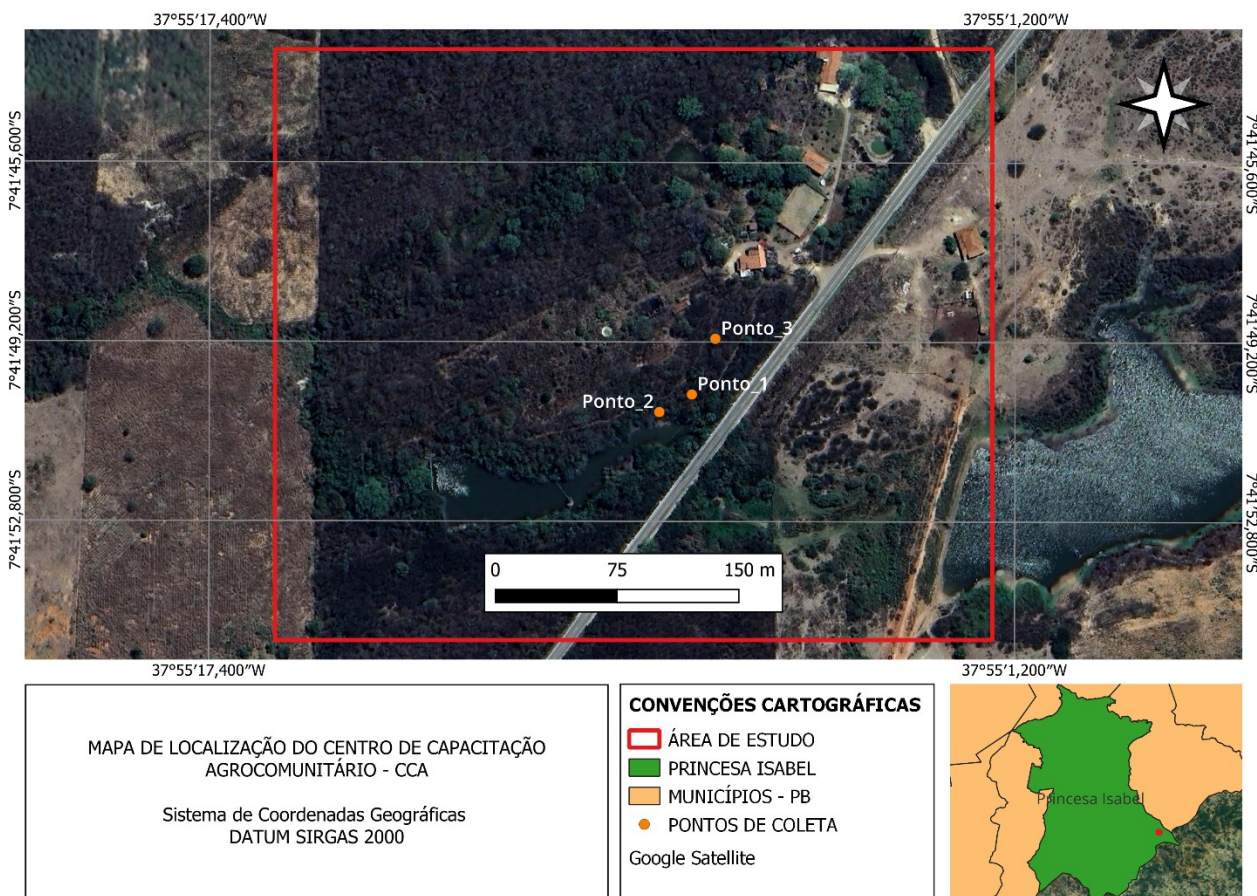


Figura 1 – Mapa de localização do Centro de Capacitação Agrocomunitário – CCA.

Fonte: Autores (2025).

Por sua vez, o município de Princesa Isabel localiza-se à latitude $7^{\circ}44'17''S$ e à longitude $37^{\circ}59'42''W$, com altitude de 683 metros, a cerca de 420 km de distância da capital do estado, João Pessoa. A população do município, segundo o recente censo demográfico, é de 21.114 habitantes (IBGE, 2022).

Segundo Beltrão *et al.* (2005), a vegetação é de pequeno porte, típica de caatinga xerofítica, onde se destaca a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno a médio porte. O solo é classificado como Argissolo vermelho-amarelo que são solos caracterizados pela presença de horizonte B textural, com cores vermelho-amarelas e textura argilosa, abaixo de um horizonte A ou E de cores mais claras e textura arenosa ou média, ocorrendo em maior destaque nos estados do Ceará, Bahia, Rio Grande do Norte e Paraíba (EMBRAPA, 2018).

2.1 Procedimento para a coleta de dados

As coletas de solo foram realizadas com o auxílio de um trado manual e um amostrador em três pontos aleatórios (Figura 2), nos meses de agosto e novembro de 2024, no período seco, por se tratar de uma amostragem exploratória. Esse tipo de amostragem é amplamente empregado em estudos de reconhecimento, nos quais o objetivo é identificar tendências e subsidiar planejamentos futuros com delineamento amostral mais robusto (Marconi; Lakatos, 2009). Foram realizadas seis coletas ao todo, sendo três na profundidade de 0–10 cm e três na profundidade de 10–20 cm, as quais foram georreferenciadas utilizando o aplicativo CR Campeiro 7.

As amostras foram coletadas nestas profundidades para fins de conhecimento da fertilidade do solo, sendo que se trata de uma área preservada há mais de trinta anos, a qual é fundamental para a conservação da biodiversidade e dos recursos naturais, como também gera benefícios, tais como a proteção do solo contra erosão e a regulação do clima.



Figura 2 – Processo de coleta das amostras.

Fonte: Autores (2025).

Após a coleta em campo, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente etiquetadas e encaminhadas ao laboratório de química para processamento e análises. Estas amostras com estrutura deformada foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) para as análises químicas e físicas de caracterização do solo (EMBRAPA, 1997).

Para a determinação da quantificação da matéria orgânica presente nos solos, é utilizado o Método da Calcinação “*Loss of Ignition*”, que se baseia na utilização da mufla à temperatura de 500°C (Ramírez; Matos, 2022).

Na Figura 3 é demonstrado o processo de obtenção de MOS. Inicialmente são pesadas cerca de 100 g de cada amostra do solo, previamente secas a 105°C na estufa e, posteriormente, aproximadamente 4 g de cada amostra são levadas à mufla aquecida a 500°C por 4 h. Através da razão entre o peso da fração calcinada das amostras e o peso do solo seco em estufa a 105°C obtém-se o teor de MOS conforme Davies (1974).



Figura 3 – Processo de obtenção da MOS.
Fonte: Autores (2025).

As amostras foram pesadas em uma balança digital com uma sensibilidade de 0,001 gramas e foi posteriormente realizada a medição única de potencial hidrogeniônico do solo (pH), descrito no manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997). A Figura 4 demonstra o processo de análise das amostras.



Figura 4 – Etapa de peneiramento, medição de pH e pesagem.
Fonte: Autores (2025).

2.3 Análise estatística de dados

Foi utilizado o Microsoft Excel como ferramenta para a obtenção de estatísticas descritivas, as quais, segundo Marconi e Lakatos (2009), objetivam representar, de forma concisa, sintética e compreensível, a informação contida num conjunto de dados. Esta tarefa, que adquire grande importância quando o volume de dados for grande, concretiza-se na elaboração de tabelas e de gráficos, e no cálculo de medidas ou indicadores que representam convenientemente a informação contida nos dados.

Para o tratamento dos dados, foi testada a sua normalidade e utilizada a correlação linear de Pearson, definida por Levine *et al.* (Levine; Stephan; Szabat, 2016, p. 137), como aquela que:

[...] mede a força relativa da relação linear entre duas variáveis numéricas. Os valores para o coeficiente de correlação se estendem desde -1 , para uma correlação negativa perfeita, até $+1$, para uma correlação positiva perfeita. Perfeita, nesse caso, significa dizer que, se os pontos fossem desenhados em um gráfico de dispersão, todos esses poderiam ser interligados (Levine *et al.*, 2016, p. 137).

2.4 Aquisição e processamento das imagens

A primeira etapa consistiu na aquisição das imagens utilizadas da coleção de dados do satélite Sentinel-2, presentes na plataforma Google *Earth Engine* (GEE). O Sentinel-2 fornece imagens óticas de alta resolução para os serviços terrestres, tais como imagens da vegetação, da cobertura do solo e da água, das vias navegáveis interiores e das zonas costeiras.

Os índices testados e computados por meio de um *script* no GEE foram: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e CO₂Flux. As imagens utilizadas foram datadas de 27 de agosto de 2024, por serem do mesmo mês da primeira coleta de solo. As imagens de 27 de agosto de 2024 foram selecionadas em razão de sua coincidência temporal com a primeira coleta de amostras de solo, realizada no mesmo mês, garantindo consistência temporal entre os dados laboratoriais e os dados orbitais. Além disso, o mês de agosto corresponde ao período seco na região do Semiárido paraibano, caracterizado por menor cobertura de nuvens e maior estabilidade atmosférica, o que favorece a obtenção de imagens com baixa interferência atmosférica (Barbosa; Huete; Baethgen, 2006). A utilização de uma única imagem é justificada pelo caráter exploratório do estudo e pela estabilidade da cobertura vegetal esperada em uma área preservada há mais de 30 anos, onde variações abruptas de NDVI em escala de dias são improváveis. Contudo, reconhece-se como limitação a não utilização de séries temporais, o que poderá ser contemplado em estudos de monitoramento contínuo.

O NDVI foi proposto por Rouse *et al.* (1973, citado por Yan *et al.*, 2025) e é bastante utilizado até hoje para diversas finalidades, como detecção de áreas cobertas por vegetação e estimativas de biomassa, verificação do vigor e produção de culturas, estimativas de cobertura vegetal, dentre outras (Paruelo *et al.*, 2000; Abreu e Coutinho, 2014).

Para o cálculo do NDVI são empregadas as bandas do vermelho (V), utilizadas pela vegetação durante o processo de fotossíntese, e do infravermelho (IV), refletidas durante o mesmo processo. O índice é calculado com base na relação entre as reflectâncias (ρ) do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IV) e seu valor varia entre -1 e 1 . Quanto maior esse valor, maior a atividade fotossintética da vegetação (Eq. 1).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad \text{Eq. 1}$$

O mapeamento da vegetação utilizando o NDVI permite estimar a sua biomassa e, conseqüentemente, relacioná-la ao estoque de carbono (Silva; Baptista, 2025).

Para determinar o CO₂Flux foi necessário realizar os cálculos de NDVI, Índice de Refletância Fotoquímica (PRI) e Índice de Refletância Fotoquímica reprogramado para valores positivos (sPRI). O PRI (Eq. 2) foi estabelecido para aferir a eficácia fotossintética empregando as bandas de reflectância nos comprimentos de onda do azul (B) e do verde (G) (Moreira, 2005).

$$PRI = (\rho_B - \rho_G) / (\rho_B + \rho_G) \quad \text{Eq. 2}$$

O PRI expressa a relação entre as bandas do verde e azul e, segundo Xu *et al.* (2025), pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético. Salienta-se, porém, que os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Eq. 3). O índice sPRI possui o mesmo significado do PRI, mas é representado em uma escala variável entre 0 e 1 para ficar com a mesma escala do NDVI.

$$sPRI = \frac{PRI+1}{2} \quad \text{Eq. 3}$$

Por sua vez, o CO₂Flux é a integração do índice de reflectância fotoquímica, ou PRI, que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, com o NDVI (Xu *et al.*, 2025), que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, o que possibilitaria integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro de carbono. A esse índice integrado, Baptista (2003) chamou de CO₂Flux (Eq. 4).

$$CO_2 \text{ Flux} = sPRI \times NDVI$$

Eq. 4

3. Resultados e discussão

A quantidade de matéria orgânica do solo para diferentes amostras determinada pelo método da mufla variou de 1,71 a 2,08% na profundidade de 0-10 cm e de 1,65 a 1,73% na profundidade de 10-20 cm no total de 6 amostras analisadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Cálculo da Matéria Orgânica nas duas profundidades de solo avaliadas.

Amostra	Solo seco a 105 °C	Solo após a queima a 500 °C	Quantidade da Matéria Orgânica (g)	Matéria Orgânica (%)
Amostra 1 Prof. 0-10cm	19,00	18,85	0,14	1,85
Amostra 2 Prof. 0-10cm	20,02	19,77	0,25	1,71
Amostra 3 Prof. 0-10cm	17,00	16,65	0,35	2,08
Amostra 1 Prof. 10-20cm	20,00	19,81	0,18	1,75
Amostra 2 Prof. 10-20cm	20,02	19,77	0,25	1,65
Amostra 3 Prof. 10-20cm	18,11	17,79	0,31	1,73

Fonte: Autores (2025).

Os resultados referentes à análise descritiva dos atributos do solo nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm são apresentados nos valores médios da MOS (g) e MOS (%), respectivamente, na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de MOS (g) e MOS (%)

Profundidade	Média MOS (g)	MOS (%)
0-10cm	0,25	1,88
Profundidade 10-20cm	Média MOS (g)	(%)
10-20cm	0,25	1,71

Fonte: Autores (2025).

A quantidade de MO nos solos do Brasil é influenciada por vários fatores, como o clima tropical (que acelera a decomposição da matéria orgânica), o tipo de vegetação, o uso do solo (como agricultura ou pastagens) e práticas de manejo. Solos com 1 a 2% de MO são mais comuns, pois o clima tropical favorece a mineralização da matéria orgânica e não sua acumulação no solo. Já solos com matéria orgânica acima de 4 a 5% estariam se referindo a solos muito raros no Brasil. Como os solos brasileiros possuem baixa quantidade de MO, aumentou-se o uso de resíduos na adubação das lavouras (Fonseca *et al.*, 2024).

3.1 Matéria orgânica do solo no fragmento florestal

Por meio dos resultados obtidos, foi possível evidenciar que o teor de matéria orgânica na primeira camada (0-10 cm) foi maior. Isto pode ser explicado por diversos motivos relacionados à dinâmica do acúmulo de MOS, tais como a interação com as plantas, maior atividade biológica (organismos decompositores: minhoca, insetos) e acúmulo de resíduos vegetais

(serrapilheira). Há presença de formas de vida em toda extensão do solo, porém é nessas áreas que os seres vivos se tornam mais abundantes e ativos (Philippot *et al.*, 2013).

Devido ao acúmulo de matéria orgânica proveniente da cobertura florestal, as camadas que recebem maior aporte desse material orgânico são as superficiais. Isso justifica o fato de o teor de carbono orgânico total variar, diminuindo conforme a profundidade (Ozório *et al.*, 2019; Lima; Souza; Lima, 2024).

Na Figura 5 é possível corroborar tal assertiva, pois o teor de MOS diminuiu na camada de 10-20 cm.

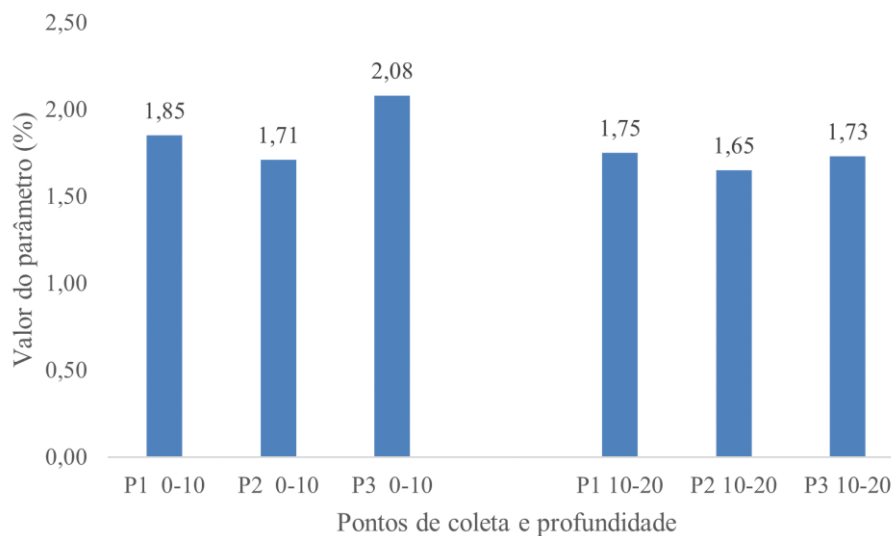


Figura 5 – Teor de MOS (%).

Fonte: Autores (2025).

De acordo com Silva *et al.* (2019), ao fazerem uma revisão sobre a matéria orgânica e suas inter-relações com os atributos físicos do solo, constatou-se que a matéria orgânica tem uma alta relação com a capacidade de troca catiônica, tendo reflexos na densidade do solo, ou seja, o aumento do depósito de matéria orgânica no solo causa diminuição na densidade. Ao longo dos últimos anos no semiárido brasileiro têm se intensificado os estudos de matéria orgânica no solo como indicador de qualidade do solo (Iwata *et al.*, 2020).

3.2 Potencial hidrogeniônico no solo

A análise dos teores médios de pH indicou um pH ácido nas duas camadas analisadas. A distribuição deste nutriente ao longo do perfil do solo apontou que o pH na camada superficial (0-10cm) foi maior e na camada subsuperficial do solo (10-20 cm) ele diminuiu, neste contexto, para as profundidades, percebeu-se que no geral o pH tendenciou a uma redução com o aumento da profundidade.

No Semiárido, em geral, os solos são moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos (pH em água entre 5,3 e 8,3). Porém, em situações localizadas, tanto em função do material de origem como da drenagem local, os solos podem apresentar reação fortemente ácida (pH < 5,3) ou até mesmo fortemente alcalina (pH > 8,3) (Araújo Filho *et al.*, 2022).

O pH do solo é um atributo que dá um indicio da disponibilidade dos nutrientes para a planta; assim sendo, antes de iniciar o manejo do solo, deve-se conhecer as reais condições de sua acidez ou alcalinidade, para que os nutrientes sejam disponibilizados em uma faixa ideal, sendo essa entre 5,5 a 6,5 (Malavolta, 1979). De acordo com essa afirmação, a faixa ideal situa-se entre 5,5 e 6,5, intervalo no qual os nutrientes apresentam maior disponibilidade. Observa-se, portanto, que o pH da área preservada encontra-se adequado, o que evidencia que os processos naturais de ciclagem de nutrientes, sustentados pela vegetação nativa e pela serrapilheira, são suficientes para manter o equilíbrio químico do solo sem necessidade de intervenção."

Na pesquisa realizada por (Freitas *et al.* 2017), sobre a qualidade química do solo sob diferentes manejos, afirmam que solos com pH variando entre 3,7 a 6,2 são um indicador de disponibilidade de macro e micronutrientes nas plantas. Oliveira *et al.* (2023) afirmam que o pH ideal seria de 5,5 e 6,5 para melhor desempenho das culturas. De acordo com Freire Filho

et al. (2011), a classificação agrônômica é considerada boa com o pH de 5,5 e muito alta para pH acima de 7, assim o resultado das amostras se enquadra de bom desempenho, conforme a Figura 6.

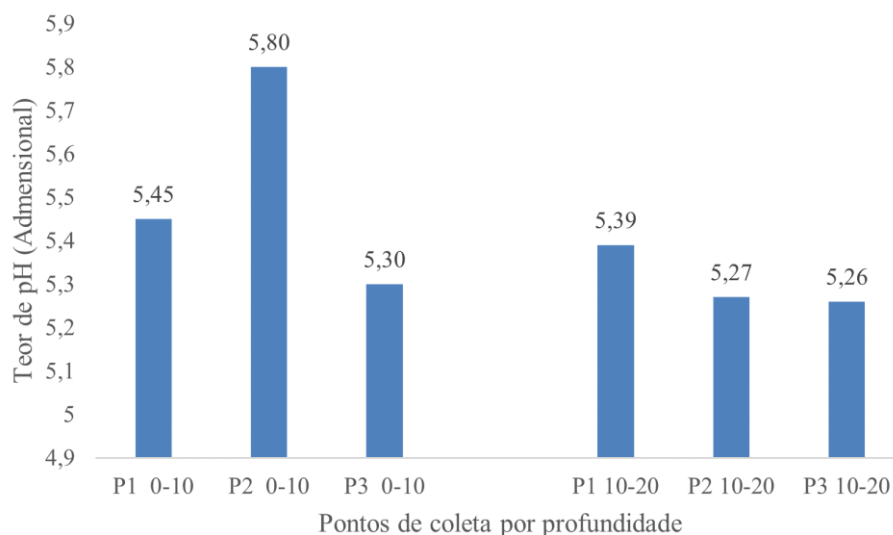


Figura 6 – Teor de pH nas camadas do solo.
Fonte: Autores (2025).

Neste sentido, segundo os resultados obtidos, pode-se dizer que a AP se encontra com uma boa disponibilidade deste nutriente. Segundo Moreira, Cares e Stürmer (2013), descrevem que para avaliar a acidez do solo é necessário conhecer o pH do solo e a quantidade de alumínio. O termo pH define a acidez ou alcalinidade relativa de uma solução. A escala de pH cobre uma amplitude de 0 a 14. Um valor de pH igual a 7 é neutro. Ainda segundo os autores, valores abaixo de 7 são ácidos e acima de 7 são básicos. A maioria dos solos produtivos varia entre os valores de pH 4 e 9.

3.3 Correlação MOS X pH

Os resultados da análise de correlação linear de Pearson (r) entre MOS e pH apresentaram correlação forte, na camada de 0 - 10 cm ($r = 0,87$), isto significa dizer que os valores se aproximaram de 1 (Figura 7) e apresentaram correlação linear moderada na camada de 10 - 20 cm ($r = 0,36$) (Figura 8). A correlação forte entre MOS e pH na camada superficial ($r = 0,87$; 0-10 cm) resultou nos valores próximos de 1 (Figura 7) e apresentou correlação linear moderada na camada subsuperficial ($r = 0,36$; 10-20 cm) (Figura 8), o que representa o achado central deste estudo, pois evidencia que o acúmulo de matéria orgânica decorrente da serrapilheira e da atividade biológica intensa na superfície condiciona diretamente o equilíbrio ácido-base do solo. Esse resultado ganha relevância no contexto da Caatinga, bioma em que a escassez hídrica frequentemente limita tanto a produção de biomassa quanto os processos de ciclagem de nutrientes. A força dessa correlação sugere que, na área preservada estudada, a MOS exerce papel tampão sobre o pH, moderando a acidificação natural típica de solos sob vegetação nativa (Ebeling *et al.*, 2008), o que cria condições propícias à manutenção da fertilidade e da biota do solo a longo prazo.

Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; escores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancey e Reidy (2006) apontam para uma classificação ligeiramente diferente: $r = 0,10$ até $0,30$ (fraco); $r = 0,40$ até $0,60$ (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte). Seja como for, o certo é que quanto mais perto de 1 (independentemente do sinal), maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis. Abaixo, são apresentados os resultados da correlação entre MOS e pH do solo nas duas camadas.

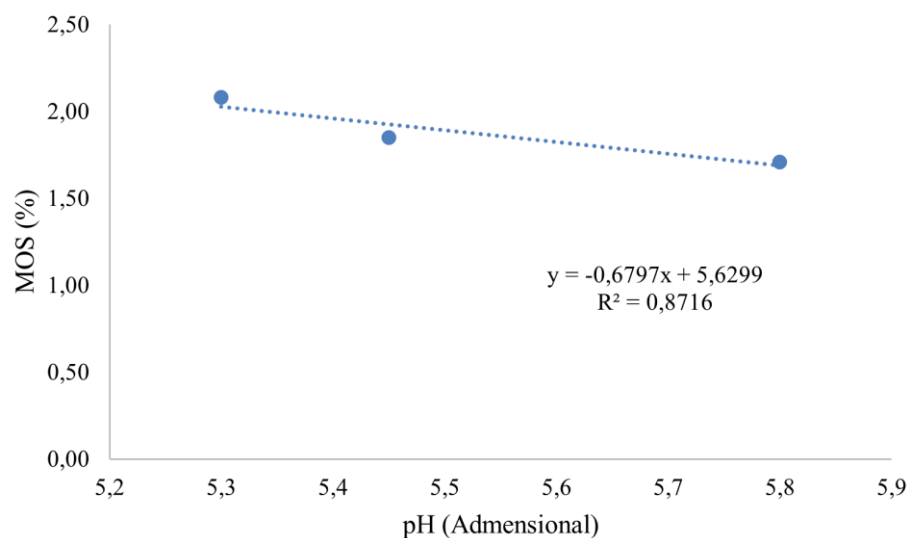


Figura 7 – Correlação MOS x pH na camada (0-10 cm).
Fonte: Autores (2025).

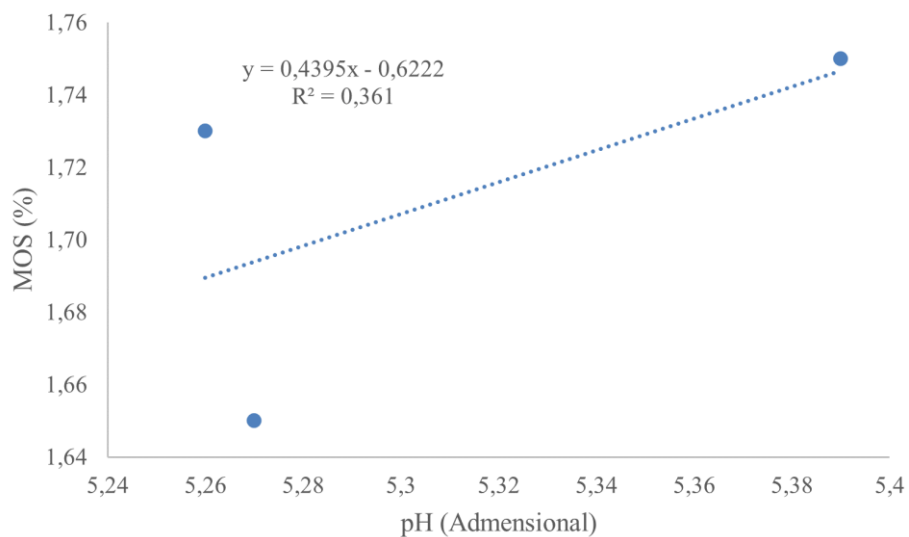


Figura 8 – Correlação MOS x pH na camada (10-20 cm).
Fonte: Autores (2025).

Esses resultados confirmaram que a MOS se correlacionou com o pH mais positivamente na camada de (0-10 cm). Isso pode ser explicado, na maioria das vezes, por estes atributos do solo desempenharem papéis interligados no suporte às populações dos microrganismos. A matéria orgânica, por exemplo, é uma importante fonte de nutriente para estes microrganismos (Andrade, 2020).

Com relação ao pH, Ebeling *et al.* (2008) afirmam que quanto maior o conteúdo de carbono, maior tenderá a ser a acidez do solo. Isto significa dizer que a presença de matéria orgânica no solo tende a melhorar a neutralidade ou reduzir a acidez do solo.

Portanto, através dos resultados obtidos, foi possível concluir que a MOS e o pH são dois componentes críticos da saúde do solo, os quais estão intimamente interligados e atuam como um agente de ligação, ajudando a criar agregados do

solo que melhoram a estrutura e a porosidade do solo. Isso, por sua vez, influencia o pH do solo ao afetar a disponibilidade de nutrientes e a atividade dos microrganismos do solo.

Um coeficiente de correlação positivo indica que, à medida que a matéria orgânica do solo aumenta, o pH tende a aumentar também, enquanto um coeficiente de correlação negativo sugere o oposto. Ademais, a relação entre MOS e pH na área estudada desempenha um papel importantíssimo na fertilidade e produtividade do solo. Entender essa correlação pode contribuir para a compreensão dos mecanismos naturais que regulam a fertilidade dos ecossistemas edáficos da AP, reforçando o valor intrínseco da preservação como estratégia de manutenção do equilíbrio químico do solo sem necessidade de intervenção antrópica.

3.4 NDVI e CO₂Flux

Os resultados dos processamentos foram um mapa com a distribuição espacial de valores de NDVI e CO₂flux na área analisada no município de Princesa Isabel (Figura 9).

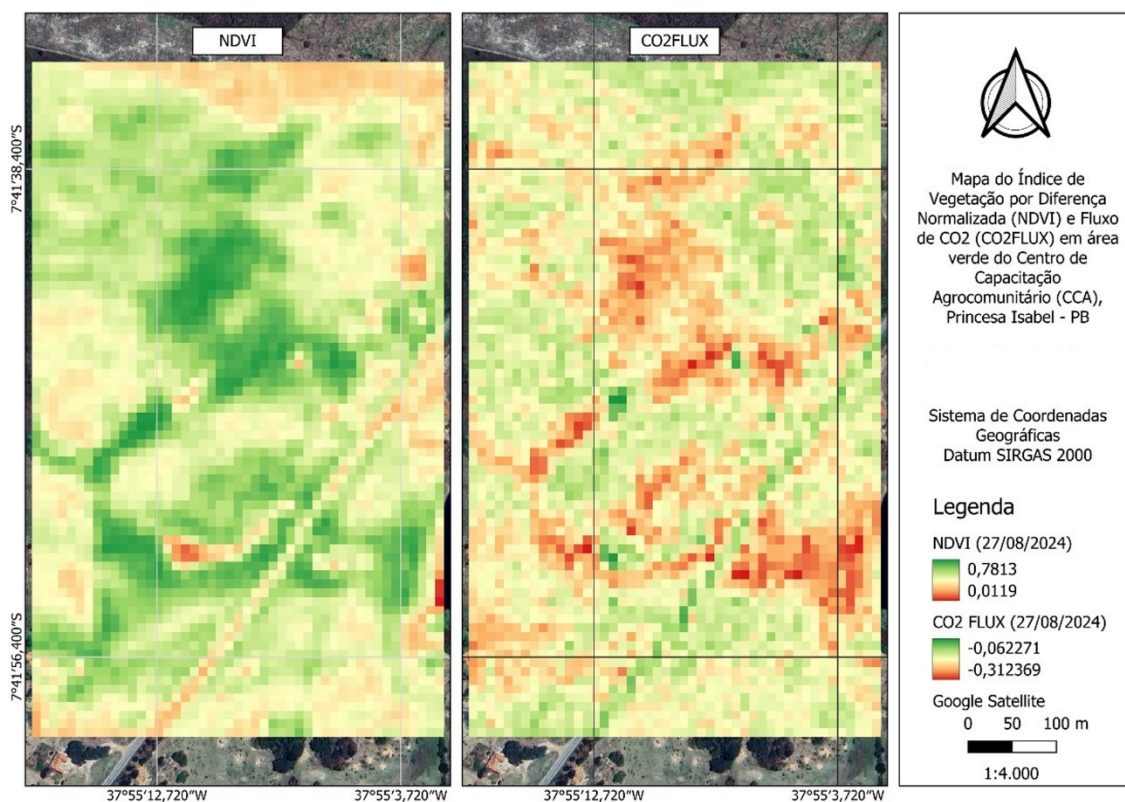


Figura 9 – Caracterização dos índices de vegetação NDVI e CO₂flux.

Fonte: Autores (2025).

Os resultados apresentados na Figura 9 para o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) demonstraram que quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação (Pinto; Pamboukian, 2024), enquanto o valor 0 (zero) ou próximo de 0 (zero) indica superfície não vegetada ou com pouca vegetação, respectivamente. Assim, pode-se observar que os valores do NDVI gerados variaram de 0,01 a 0,78. Isto implica dizer que a maior parte da área estudada apresentou elevada densidade vegetal, onde se nota amplo predomínio de floresta densa.

A escala de cores que vai do vermelho (valores mais baixos) ao verde (valores mais altos) indicou que, com relação aos índices de vegetação, quanto maior o valor, mais vigorosa é a vegetação.

Os valores de NDVI nas proximidades dos pontos onde foram coletadas as amostras apresentaram boa relação, sendo que se mostraram bastante significativos, pois quando o NDVI está próximo de 1, isso geralmente significa que a vegetação está saudável, o que pode ser atribuído a um solo rico em matéria orgânica e com pH adequado.

Em analogia às espécies vegetais cultivadas, onde existe uma relação direta da densidade da vegetação com o NDVI (Lopes *et al.*, 2011), podemos inferir que os valores desse índice para vegetação de Caatinga preservada variam em função da área foliar, uma vez que, para o intervalo de tempo em estudo, não é possível verificar um aumento expressivo na densidade de plantas e se tratando de uma área preservada há mais de 30 anos, pode-se esperar que exista uma estabilidade vegetacional da comunidade de plantas neste estado de preservação. Outros trabalhos verificaram, para florestas decíduas, boa correlação entre parâmetros da vegetação e sua resposta espectral (Wang *et al.*, 2005; Barbosa; Huete; Baethgen, 2006).

A partir da aplicação dos índices para a obtenção do CO₂Flux foi possível identificar, a partir do mapa, a eficiência de sequestro de carbono na AP (Figura 9), que apresentou (CO₂Flux de até -0,31). Esses valores são comuns em biomas com forte sazonalidade hídrica, como a Caatinga, especialmente no período seco. As variações dos dados de fluxos também foram observadas em outras regiões no semiárido pernambucano por Oliveira *et al.* (2023) analisando fluxos de CO₂ também em uma floresta preservada, e a partir das observações, os autores pontuaram que a dinâmica do carbono na Caatinga ora ela atua como fonte e ora como sumidouro de carbono. Pereira *et al.* (2020), utilizando resultados de CO₂Flux, afirmam que áreas com maiores densidades florestais são mais eficientes no processo de sequestro de carbono.

É importante ressaltar que essa dinâmica está diretamente relacionada aos baixos índices pluviométricos observados no mês em que foi realizada a coleta de dados (agosto), que resultaram em um déficit hídrico prolongado ao longo do ciclo experimental. A restrição hídrica, característica do ano com precipitações abaixo da média, promoveu uma redução significativa na atividade fotossintética da vegetação, ocasionando o fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, um incremento nas emissões de CO₂. Dessa forma, as condições de escassez de água limitaram a assimilação de carbono, refletindo-se em um balanço de carbono baixo; ainda assim, a área analisada sugere que o solo está funcionando como um sumidouro de carbono. Isso é geralmente um bom sinal por significar que o solo está armazenando mais carbono do que está liberando, o que pode estar relacionado à presença de matéria orgânica.

Neste sentido, mesmo sob condições de estresse hídrico severo, o solo da área preservada demonstrou comportamento predominante de sumidouro de carbono, o que pode ser atribuído, em grande parte, ao papel protetor da serrapilheira e da cobertura vegetal densa. O dossel contínuo, evidenciado pelos valores elevados de NDVI (até 0,78), atua como barreira física que reduz a incidência direta da radiação solar sobre a superfície do solo, diminuindo sua temperatura e, conseqüentemente, inibindo os processos oxidativos da MOS (Philippot *et al.*, 2013). A serrapilheira, além de constituir aporte contínuo de carbono ao sistema, forma uma camada isolante que preserva a umidade residual do solo durante o período seco, sustentando a atividade microbiana responsável pela imobilização do carbono em formas mais estáveis. Essa resiliência estrutural do ecossistema preservado explica, portanto, a capacidade de manutenção do balanço negativo de CO₂ mesmo em períodos de baixa produtividade fotossintética, conforme observado por (Mendes *et al.* 2020, 2021) para ecossistemas de Caatinga.

Em resumo, a relação entre o teor de CO₂, alta matéria orgânica e pH equilibrado sugere que o solo da área estudada proporciona um ambiente saudável, com boa disponibilidade de nutrientes e promove a sustentabilidade dos ecossistemas à sua volta.

As florestas tropicais brasileiras sazonalmente secas possuem um papel conhecido no sequestro de CO₂; contudo, ainda há necessidade de levantamentos aperfeiçoados e detalhados sobre cada região. Uma das formas de conhecer as diferentes formações florestais, principalmente as de difícil acesso, é por meio da aplicação dos índices de vegetação, os quais são obtidos por meio de imagens de sensoriamento remoto (Mendes *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2020; Mendes *et al.*, 2021).

Os índices de vegetação NDVI e CO₂Flux são ferramentas eficientes para a gestão e conservação de áreas preservadas, pois fornecem um panorama completo da condição e dinâmica da vegetação desses espaços, auxiliando na gestão sustentável e na proteção desses ambientes essenciais para o equilíbrio ambiental.

4. Considerações finais

Na área preservada de Princesa Isabel, observou-se um perfil de solo marcado pelo acúmulo de matéria orgânica em superfície, reflexo direto da interação entre a serrapilheira e a intensa atividade biológica dos organismos edáficos. Essa camada mais enriquecida de MOS expressa o papel da vegetação nativa em manter a ciclagem de nutrientes e regular a fertilidade natural do solo, mesmo em condições restritivas do Semiárido. A estabilidade proporcionada por esse aporte contínuo de resíduos vegetais ilustra como a preservação ambiental sustenta a resiliência ecológica e cria condições favoráveis para processos de retenção de água e manutenção da biodiversidade subterrânea.

Outro ponto relevante foi a relação estabelecida entre pH e MOS. A correlação positiva identificada principalmente na camada superficial revelou que ambos os atributos interagem de forma integrada na regulação da fertilidade e no suporte à atividade microbiana. Esse achado sugere que o equilíbrio químico do solo não apenas favorece a disponibilidade de

nutrientes, mas também atua como um fator de resiliência ecológica, mitigando os efeitos adversos das condições edafoclimáticas típicas do Semiárido. Ao evidenciar a influência conjunta da acidez e da matéria orgânica, este trabalho oferece subsídios para a compreensão dos mecanismos naturais de regulação química do solo em áreas com vegetação nativa preservada, contribuindo para o entendimento dos processos pedoquímicos que governam a dinâmica de nutrientes em ecossistemas sob condições de equilíbrio biogeoquímico de longa duração.

No que se refere ao sensoriamento remoto, os índices NDVI e CO₂Flux mostraram-se ferramentas eficazes para a caracterização da cobertura vegetal e para a compreensão dos processos relacionados ao sequestro de carbono. Os valores elevados de NDVI na área estudada apontaram para uma vegetação vigorosa e estável, condizente com um fragmento preservado há mais de três décadas. Já a aplicação do CO₂Flux destacou áreas com maior capacidade de absorção de carbono, revelando o papel estratégico da preservação florestal no enfrentamento das mudanças climáticas. A integração desses índices, portanto, amplia as possibilidades de monitoramento ambiental com custo reduzido e elevada precisão.

A convergência entre os resultados de campo e os obtidos por meio das imagens orbitais confirma a pertinência de associar análises laboratoriais tradicionais às tecnologias de sensoriamento remoto. Essa complementaridade metodológica não apenas fortalece a confiabilidade dos dados, mas também oferece perspectivas para o desenvolvimento de protocolos de monitoramento contínuo em unidades de conservação e propriedades rurais.

O cruzamento entre a dinâmica da matéria orgânica, os padrões de pH e os índices espectrais revelou um ecossistema preservado que atua simultaneamente como espaço de equilíbrio funcional entre solo e vegetação. O vigor detectado pela resposta espectral da cobertura vegetal, aliado à fertilidade favorecida pelo acúmulo de MOS, delineia uma área capaz de sustentar serviços ecossistêmicos essenciais em escala regional. Essa leitura integrada, que combina análises laboratoriais e ferramentas de sensoriamento remoto, abre caminhos para aprofundar a compreensão sobre a Caatinga preservada e reafirma a relevância desses fragmentos como referência ecológica para estratégias de conservação, monitoramento ambiental e mitigação climática.

Referências

- ABREU, K. M. P. de; COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. *Revista Vértices*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 177–202, 2014.
- ANDRADE, F. M. C. *Caderno dos Microrganismos Eficientes (E.M.)*: Instruções práticas sobre uso ecológico e social do EM. 3. ed. Viçosa: UFV, 2020.
- ARAÚJO FILHO, J. C. de *et al.* Solos do Semiárido: características e estoque de carbono. In: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (Org.). *Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira*. Brasília, DF: Embrapa, 2022.
- BAPTISTA, G. M. M. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. *Anais [...] Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, v. 11, Belo Horizonte – MG; São José dos Campos – SP: INPE, 2003. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf. Acesso em: 4 out. 2024.
- BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 288–307, 2006.
- BELTRÃO, B. A. *et al.* (Org.). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado de Paraíba, diagnóstico do município de Princesa Isabel. Recife: CPRM, 2005. *Atlas Digital dos Recursos Hídricos Subterrâneos*. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16286?mode=full>. Acesso em: 28 set. 2024.
- COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2. ed. New York: Second Edition, 1988.
- DANCEY, C.; REIDY, J. *Estatística sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- DAVIES, B. E. Loss-on-Ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 150–151, 1974.

- DOS SANTOS, L. R. *et al.* Does irrigated mango cultivation alter organic carbon stocks under fragile soils in semiarid climate?. *Scientia Horticulturae*, [s. l.], v. 255, p. 121–127, 2019.
- EBELING, A. G. *et al.* Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 429–439, 2008.
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análises de solo*. 2. ed. Embrapa: Embrapa, 1997.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- FONSECA, C. S. da. *Caracterização das fases da compostagem de Gliricídia sepium e quantificação de matéria orgânica utilizando espectrometria*. Seropédica, 2024. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2024.
- FREIRE FILHO FR, *et al.* *Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios*. Embrapa Meio-Norte. 84p, 2011.
- FREITAS, L. *et al.* Indicadores da qualidade química e físico solo sob diferentes sistemas de manejo. *Unimar Ciências*, v. 26, n. 1-2, 201726: 8-25, 2017.
- GUERINI F, M.; KUPLICH, T. M.; QUADROS, F. L. F. D. 2020. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 41, n. 8, p. 2861-2876.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades*. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/princesa-isabel.html>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- IWATA, B. F.; COSTA, M. C. G.; LEITE, L. F. C.; NASCIMENTO, B. L. M.; SOUSA ALMEIDA, K.; BARBOSA, D. L. S.; BRANDÃO, M. L. S. M. Manejo de resíduos em argissolo sob agrofloresta no semiárido cearense. *Brazilian Journal Of Development*, v. 6, n. 4, p. 20702-20716, 2020.
- LEVINE, D. M.; STEPHAN, D. F.; SZABAT, K. A. *Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- LIMA, P. da S. L.; SOUZA, A.; LIMA, E. do V. Macrofauna do solo como instrumento biológico de avaliação da saúde do solo, em vegetação secundária, no município de Capanema, PA. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, [s. l.], v. 7, n. 4, p. e74370-e74370, 2024.
- LIU, W. T. H. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006.
- LOPES, H. L. *et al.* Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [s. l.], v. 15, n. 9, p. 973–980, 2011.
- MALAVOLTA, E. *Nutrição mineral e adubação da laranja*. São Paulo: Ultrafertil, Ultrafertil, 1979. 63 p.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração e interpretação de dados*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- MENDES, K. R. *et al.* Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). *Forests*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 86, 2021.
- MENDES, K. R. *et al.* Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 9454, 2020.
- MOREIRA, F. M. S.; CARES, J. E.; STÜRMER, S. L. *O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal*. Lavras: Ed. UFLA, 2013.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 3. ed. Ed. UFV: Viçosa, 2005.

- OKOLO, C. C. *et al.* Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [s. l.], v. 297, p. 106924, 2020.
- OLIVEIRA, C. L.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; DANTAS, A. C.; SOUZA, E. S.; FERREIRA, R. C. 2023. A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono? *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16, 02, 791-804.
- OLIVEIRA, W.M.C. *et al.* Soil quality indicators for *Urochloa brizantha* fertilized with wood ash. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 27, n. 4, p. 241-249, 2023. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* Abr 2023, Vo-lume 27 Nº 4 Páginas 241 –249.
- OZÓRIO, J. M. B. *et al.* Carbon stock and soil aggregation under forest fragments in the atlantic forest and cerrado biomes. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, [s. l.], n. 53, p. 97–116, 2019.
- PARUELO, J. M. *et al.* Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 189–195, 2000.
- PEREIRA, L. C. *et al.* Fluxo de CO₂ e os índices de vegetação do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 7, p. 3585-3601, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3585-3601>.
- PHILIPPOT, L. *et al.* Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 789–799, 2013.
- PINTO, K. F.; PAMBOUKIAN, S. V. D. Uso de geotecnologias para detecção de desmatamentos. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 62–86, 2024.
- RAMÍREZ, V. S.; MATOS, A. T. D. Influência da textura do solo receptor e das condições climáticas e ambientais na taxa e fração de mineralização da matéria orgânica no solo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 315–323, 2022.
- SILVA, F. O. da. *Uso da Espectroscopia Vis-NIR na avaliação da fertilidade dos solos do Estado da Bahia*. Cruz das Almas, 2020. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo e Qualidade de Ecossistemas). Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo e qualidade de Ecossistemas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Cruz das Almas-BA, 2020.
- SILVA, F. W. A.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; de OLIVEIRA, V. N. S. Matéria orgânica e suas inter-relações com os atributos físicos do solo. In: SEABRA, G.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; OLIVEIRA, V. N. S. de. (Org.). *Terra – Habitats Urbanos e Rurais*. Ituiutaba: Barlavento, 2019. p. 255-267.
- SILVA, J. B. da; BAPTISTA, G. M. de M. Mapeamento do sequestro de carbono na cidade de Iguatu, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, [s. l.], v. 6, n. 1, 2025.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.
- WANG, Q. *et al.* On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, [s. l.], v. 94, n. 2, p. 244–255, 2005.
- XU, W. *et al.* Progress and Limitations in Forest Carbon Stock Estimation Using Remote Sensing Technologies: A Comprehensive Review. *Forests*, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 449, 2025.
- YAN, W. *et al.* High-temporal-resolution ERT characterization for vegetation effects on soil hydrological response under wet-dry cycles. *Biogeotechnics*, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 100155, 2025.