



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**



**RENATO FRANCISCO DA SILVA SOUZA**

**VARIABILIDADE DOS ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO, NITROGÊNIO  
TOTAL E DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> EM NEOSSOLOS SOB FLORESTA DE CAATINGA**

**AREIA**

**2022**

**RENATO FRANCISCO DA SILVA SOUZA**

**VARIABILIDADE DOS ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO, NITROGÊNIO  
TOTAL E DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> EM NEOSSOLOS SOB FLORESTA DE CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo – PPGCS do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como um dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de Concentração: Ciclos Biogeoquímicos em Agroecossistemas

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vânia da Silva Fraga

**AREIA**

**2022**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S729v Souza, Renato Francisco da Silva.

Variabilidade dos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e do efluxo de CO<sub>2</sub> em neossolos sob floresta de Caatinga / Renato Francisco da Silva Souza. - Areia:UFPB/CCA, 2022.  
93 f. : il.

Orientação: Vânia da Silva Fraga.  
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Ciência do solo. 2. Mudança climática. 3. Região semiárida. 4. Fragmentos de rochas. 5. Respiração do solo. 6. Autocorrelação espacial. I. Fraga, Vânia da Silva. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

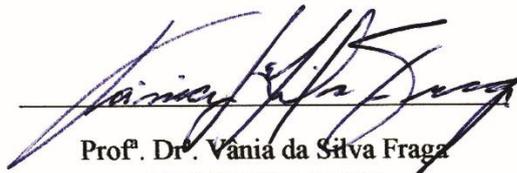
CDU 631.4(043.2)

**RENATO FRANCISCO DA SILVA SOUZA**

**VARIABILIDADE DOS ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO, NITROGÊNIO  
TOTAL E DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> EM NEOSSOLOS SOB FLORESTA DE CAATINGA**

Aprovada em: 26/02/2021

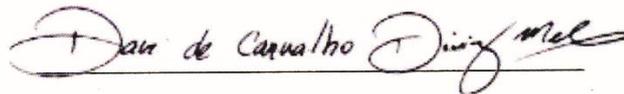
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Vânia da Silva Fraga  
PPGCS/CCA/UFPB  
Orientadora



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias  
PPGCS/CCA/UFPB  
2º Examinador – Interno



Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo  
PPGCS/CCA/UFPB  
3º Examinador – Interno



Prof. Dr. Rodolfo Marcondes Silva Souza  
Texas A & M University  
4º Examinador – Externo a instituição



Prof. Dr. Adilson Alves Costa  
UNEB  
5º Examinador – Externo a instituição

*Aos meus pais Gracineide da Silva Souza e  
Elsa Francisco de Souza, pessoas a quem devo  
a minha vida e tudo o que sou.*

*A minha irmã Raquel Souza.*

*À minha filha Sophia Souza e aos meus  
sobrinhos Heitor e Miguel.*

***Dedico***

*Ao professor, orientador e amigo Ignácio Salcedo (in  
memoriam).*

***Ofereço***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por determinar meus passos.

A minha mãe Gracineide da Silva Souza, meu porto seguro, minha fortaleza.

Ao meu pai Elso Francisco de Souza, que sempre incentivou minha vida profissional acadêmica.

A minha irmã Raquel Souza, pelo incondicional apoio durante todos os momentos da minha vida.

A minha amada esposa Ítalla Renata pelo companheirismo, amor e paciência. Aproveito e agradeço também a toda sua família.

A minha filha Sophia Souza, por retirar de mim as melhores risadas em momentos tão difíceis. Filha, papai te ama!

A professora, orientadora e sobretudo amiga Vânia da Silva Fraga. Obrigado pela confiança, dedicação, experiências e por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa.

Ao professor e amigo Bruno Dias por seus ensinamentos e conselhos, fundamentais para minha formação acadêmica e para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Ignácio Salcedo (*in memoriam*) pela amizade, legado e por ser a maior fonte de inspiração durante essa trajetória.

Ao companheiro de caminhada Victor Junior Lima Felix uma das pessoas mais admiráveis que conheci durante o doutorado. Obrigado pelas conversas, experiências e resenhas.

Aos amigos Rodrigo Santana de Macedo pelas enriquecedoras sugestões e auxílio nas pesquisas e Júlia Tavares pelas conversas, conselhos e ajuda nas análises. Muito obrigado!

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo e todo corpo docente pelo empenho em formar excelentes profissionais.

Aos amigos e colegas do PPGCS e do laboratório de Matéria Orgânica do Solo, Tiago Pessoa, João Belarmino, Kalline Carneiro, Edjane Lucena, Rodolfo, Ramón, Camila Nobrega, Camila Barbosa, Emanuel Martins, Jhony Vendruscolo, Paloma, Vanessa Gomes, Marco Aurélio e Rafael Peruano.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Instituto Nacional do Semiárido na pessoa de Dr. Salomão de Sousa Medeiros, pela estrutura e suporte.

Este trabalho faz parte do Observatório Nacional da Dinâmica da Água e do Carbono no Bioma Caatinga - ONDACBC, apoiado pela FACEPE (outorgas: APQ-0296-5.01 / 17;

APQ-0498-3.07 / 17 ONDACBC; APQ-0532- 5.01 / 14), CNPq (bolsas: 441305 / 2017-2; 465764 / 2014-2) e CAPES (bolsas: 88887.136369 / 2017-00).

Enfim, a todos aqueles que não foram citados, mas, que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Variabilidade dos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e do efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolos sob floresta de Caatinga.** 2021. 93p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

## RESUMO GERAL

Quantificar os estoques de carbono orgânico do solo (COS), nitrogênio total do solo (NTS) e o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em diferentes biomas ao redor do mundo é fundamental para compreender a mudança climática global. No entanto, a quantificação acurada é altamente desafiadora devido à alta variabilidade, especialmente em ecossistemas florestais. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo avaliar a variabilidade dos estoques de COS, NTS e do efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolos sob floresta de Caatinga. A pesquisa foi realizada na estação experimental Professor Ignácio Salcedo, no Instituto Nacional do Semiárido, município de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Um total de 363 amostras de solos foram coletadas em camadas de 10 cm de espessura, até a profundidade de 50 cm, seguindo um modelo de amostragem cíclica em um transecto de 350 m. Os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm profundidade variaram entre 20,23 e 94,78 Mg ha<sup>-1</sup> e 1,48 e 8,37 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os estoques de COS e NTS tiveram grau de dependência espacial moderado nas camadas de 0-10 e 10-20 cm e forte nas camadas subjacentes. A distância de autocorrelação espacial dos estoques de COS e NTS variou, respectivamente, de 49,63 a 72,32 m e de 48,98 a 70,23 m. Os conteúdos de fragmentos rocha, argila, P<sub>extraível</sub>, COS e NTS, influenciam os estoques de COS e NTS, e essa influência varia com a camada do solo. A variabilidade dos estoques de COS e NTS em cada camada do solo foi classificada como moderada, com base nos coeficientes de variação. A distância de autocorrelação espacial para ambos os estoques depende da profundidade do solo e, portanto, deve ser considerada ao otimizar a amostragem. A variabilidade do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo foi avaliada por meio de medições em 42 pontos, distribuídos aleatoriamente em uma área de aproximadamente 0,72 ha. O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo variou de 0,47 a 4,14 μmol de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> na estação seca e úmida, respectivamente. O conteúdo volumétrico de água do solo explicou cerca de 93% da variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo e a temperatura do solo explicou 52%. A distância espacial de autocorrelação do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo oscilou de 5,7 a 64,3 m e foi menor durante a estação úmida. A pesquisa revelou que a variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo é controlada principalmente pelo conteúdo volumétrico de água do solo. Para quantificar o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, deve-se adotar uma distância entre pontos maior que 64,3 m, para que as medidas sejam consideradas estatisticamente independentes.

**Palavras-chave:** mudança climática; região semiárida; fragmentos de rochas; respiração do solo; autocorrelação espacial.

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Variability of organic carbon, total nitrogen stocks and CO<sub>2</sub> efflux in Leptosol under Caatinga forest.** 2021. 93p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

### GENERAL ABSTRACT

Quantifying soil organic carbon (COS), soil total nitrogen (NTS) stocks and soil CO<sub>2</sub> efflux in different biomes around the world is critical to understanding global climate change. However, accurate quantification is highly challenging due to high variability, especially in forest ecosystems. Therefore, this research aimed to evaluate the variability of soil organic carbon (SOC) stocks, total nitrogen (TSN) and CO<sub>2</sub> efflux stocks in Leptosol under Caatinga forest. The research was carried out at the Experimental Station Professor Ignácio Salcedo, at the Instituto Nacional do Semiárido, in the municipality of Campina Grande, Paraíba, Brazil. A total of 363 soil samples were collected in 10 cm layers thick, up to a depth of 50 cm, following a cyclic sampling model in a 350 m transect. The stocks of SOC and TSN in 0-50 cm depth ranged between 20.23 and 94.78 Mg ha<sup>-1</sup> and 1.48 and 8.37 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. The stocks of SOC and TSN had a moderate degree of spatial dependence at 0-10 and 10-20 cm layers and strong in the underlying layers. The spatial autocorrelation distance of the SOC and TSN stocks ranged, respectively, from 49.63 to 72.32 m and from 48.98 to 70.23 m. The rock fragments contents, clay, P<sub>extractable</sub>, SOC and TSN influence the COS and NTS stocks, and this influence varies with the soil layer. The stocks of SOC and TSN show moderate variability in each soil layer was classified as moderate, based on the coefficients of variation. The spatial autocorrelation distance for both stocks is dependent on the depth of the soil and therefore should be considered when optimizing sampling. The variability of soil CO<sub>2</sub> efflux was assessed through measurements in 42 points, randomly distributed over an area of approximately 0.72 ha. The soil CO<sub>2</sub> efflux varied of 0.47 to 4.14 μmol of CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in a dry and wet season, respectively. The volumetric soil water content explained about 93% of the temporal variability of soil CO<sub>2</sub> efflux and soil temperature explained 52%. The autocorrelation spatial distance of soil CO<sub>2</sub> efflux oscillated of 5.7 to 64.3 m and were smaller during the dry season. The research revealed that the temporal variability of soil CO<sub>2</sub> efflux is mainly controlled by the volumetric soil water content. To quantify the efflux of CO<sub>2</sub> from the soil, a distance between points greater than 64.3 m must be adopted, for the measurements to be considered statistically independent.

**Keywords:** climate change; semiarid region; rock fragments; soil respiration; spatial autocorrelation.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1.** Localização da área e diagrama de amostragem cíclica mostrando os pontos de amostragem ao longo de um transecto de 350 m de comprimento em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga..... 37
- Figura 2.** Atributos físicos e químicos do solo até 50 cm de profundidade em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. FR – conteúdo de fragmentos de rochas,  $DS_{tf}$  – densidade de terra fina, COS – carbono orgânico do solo, NTS – nitrogênio total do solo, C:N – relação carbono nitrogênio. A linha horizontal dentro das caixas é a mediana, os pontos são outliers e os asteriscos às médias..... 42
- Figura 3.** Relações entre os estoques de COS nas camadas de 0-20 e 0-50 cm (A), entre os estoques de NTS nas camadas de 0-20 e 0-50 cm (B), e entre os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm (C), em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. \*\*\* Regressão significativa  $p < 0,001$ . ..... 44
- Figura 4.** Modelos teóricos de semivariogramas para os estoques de carbono orgânico do solo (ECOS) e estoques de nitrogênio total do solo (ENTs), para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. Os parâmetros encontram-se na Tabela 2..... 45
- Figura 5.** Matrizes de correlação entre os atributos do solo e os estoques de COS e NTS nas camadas de 0-20 cm (A) e 20-50 cm (B) de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. ECOS – estoque de carbono orgânico, ENTs – estoque de nitrogênio total, FR – conteúdo de fragmentos de rochas,  $DS_{tf}$  – densidade de terra fina, COS – carbono orgânico do solo, NTS – nitrogênio total do solo, C:N – relação carbono nitrogênio. \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$  e \*\*\*  $p < 0,001$ . ..... 47

### CAPÍTULO II

- Figura 1.** Locais de medição de efluxo de  $CO_2$  do solo distribuídos aleatoriamente em um ecossistema de Caatinga do nordeste do Brasil, 2018-2019..... 68
- Figura 2.** Variação temporal do efluxo de  $CO_2$  do solo ( $ECO_2$ ) e da precipitação pluvial (A), variação temporal do conteúdo volumétrico de água do solo (B) e variação temporal da

temperatura do solo (C), em Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. Cada ponto representa a média  $\pm$  desvio padrão..... 73

**Figura 3.** Modelos teóricos de semivariogramas para o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) em diferentes datas, em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. Os parâmetros encontram-se na Tabela 1. As letras representam as datas das campanhas de medição: A - 23/02/2018, B - 21/03/2018, C - 17/04/2018, D - 20/04/2018, E - 27/04/2018, F - 22/05/2018, G - 16/06/2018, H - 29/06/2018, I - 23/07/2018, J - 21/08/2018, K - 27/09/2018, L - 23/10/2018, M - 23/11/2018, N - 20/12/2018 e O - 25/01/2019. .... 74

**Figura 4.** Relações entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) com o conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ) (A) e temperatura do solo (Ts) (B), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. \*, \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. .... 76

**Figura 5.** Árvore de regressão da relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>), conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ) e temperatura do solo (Ts) (N = 598; as medições são de fevereiro de 2018 a janeiro de 2019), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. 76

**Figura 6.** Relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> (ECO<sub>2</sub>),  $\theta_v$ , Ts e os atributos do solo, em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga durante a estação úmida e seca (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J e K). \*, \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 77

**Figura 7.** Padrões espaciais gerados pela krigagem do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) para a estação úmida (A) e a estação seca (B), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. 80

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

<b>Tabela 1.</b> Estatística descritiva dos estoques de COS e NTS até 50 cm de profundidade em Neossolos pedregosos sob floresta Caatinga. ....	43
<b>Tabela 2.</b> Parâmetros dos semivariogramas e validação cruzada dos estoques de COS e NTS, para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. ....	46

### CAPÍTULO II

<b>Tabela 1.</b> Parâmetros de modelos ajustados e modelos de semivariogramas experimentais obtidos para efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. ....	75
--	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 Caatinga a floresta tropical seca do semiárido brasileiro .....	16
2.2 Estoques de carbono orgânico e nitrogênio total de solos sob Caatinga .....	17
2.3 Efluxo de CO <sub>2</sub> de solos sob Caatinga .....	18
2.4 Análise geoestatística de atributos do solo .....	20
<b>3. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>31</b>
<b>VARIABILIDADE DOS ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL EM NEOSSOLOS PEDREGOSOS SOB FLORESTA DE CAATINGA ...</b>	<b>31</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>32</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>33</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>34</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
2.1 Descrição da área de estudo .....	36
2.2 Amostragem de solo .....	36
2.3 Análise dos dados .....	38
<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
3.1 Atributos físicos e químicos do solo.....	41
3.2 Variabilidade vertical dos estoques de COS e NTS .....	43
3.3 Análise geoestatística dos estoques de COS e NTS .....	44
3.4 Correlação entre os estoques COS e NTS e os atributos do solo .....	46
<b>4. DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>
4.1 Atributos físicos e químicos do solo.....	48
4.2 Variabilidade vertical dos estoques de COS e NTS .....	48
4.3 Análise geoestatística dos estoques de COS e NTS .....	51
4.4 Correlação entre os estoques COS e NTS e os atributos do solo .....	52
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>62</b>
<b>VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DE UM NEOSSOLO LITÓLICO SOB FLORESTA DE CAATINGA</b> .....	<b>62</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>63</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>64</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>65</b>

<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>67</b>
2.1 Descrição da área .....	67
2.2 Efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ), temperatura e umidade do solo.....	67
2.3 Amostragem e análise de solo.....	68
2.4 Análise dos dados .....	69
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
3.1 Variabilidade temporal do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ).....	72
3.2 Análise geoestatística do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ) .....	73
3.3 Fatores controladores da variabilidade temporal do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ) .....	75
3.4 Fatores controladores da variabilidade espacial do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ).....	77
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>78</b>
4.1 Variabilidade temporal do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ).....	78
4.2 Análise geoestatística do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ) .....	78
4.3 Fatores controladores da variabilidade temporal do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ) .....	80
4.4 Fatores controladores da variabilidade espacial do efluxo de CO <sub>2</sub> do solo (ECO <sub>2</sub> ).....	81
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

As terras secas, caracterizadas pelo índice de aridez inferior a  $0,65 \text{ mm mm}^{-1}$  (UNEP, 1997), são ecossistemas chave no ciclo do carbono, pois devido a sua extensão estocam aproximadamente 32% do carbono orgânico total do solo em nível global, até 2 m de profundidade (Plaza et al., 2018). Dentre as terras secas as regiões semiáridas e seus ecossistemas foram recentemente identificadas com potencial de se tornarem um grande sumidouro de carbono e de controlar a variabilidade interanual do ciclo desse elemento (Ahlström et al., 2015; Mendes et al., 2020). Por esse motivo, uma série de trabalhos tem sido realizados pela comunidade científica objetivando quantificar os reservatórios de carbono (C), nitrogênio (N) e o efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo em diferentes regiões semiáridas do mundo, bem como determinar seus fatores controladores (Giongo et al., 2011; Dos Santos et al., 2021; Menezes et al., 2021).

O Brasil possui uma vasta área ocupada por região semiárida, aproximadamente  $1.127,953 \text{ km}^2$ , isso equivale a cerca de 11% de todo território nacional. A região abriga cerca de 28 milhões de habitantes (INSA, 2017). O clima tem como principal característica a irregularidade da precipitação pluvial, havendo grande variabilidade no tempo e no espaço. O relevo varia amplamente, com altitude entre 0 e 2,000 m, principalmente na região central (Almeida et al., 2017). Em relação geodiversidade os Latossolos, Neossolos Litólicos, Argissolos e Luvisolos em ordem de abrangência, ocupam 68% da região semiárida. Esses fatores e suas interrelações condicionaram uma grande diversidade ambientes e paisagens do principal ecossistema da região semiárida do Brasil, à Caatinga (Menezes et al., 2012; Arruda et al., 2015).

Os ecossistemas de Caatinga representam ambientes naturalmente heterogêneos com solos em sua maioria pouco desenvolvidos que são sensíveis a ação antrópica e às mudanças climáticas. Há forte variabilidade ambiental em escala regional e local, sobretudo nas áreas de solos derivados de cristalino, como os Neossolos Litólicos. Essa classe de solo representa 19% dos solos da região semiárida e, portanto, detém uma parcela significativa dos 4,88 e 0,61 Pg de carbono orgânico e nitrogênio total estocados no bioma Caatinga, respectivamente (Gomes et al., 2019; Dos Santos et al., 2021). Do mesmo modo, também possui um grande potencial de emissão de  $\text{CO}_2$  via respiração do solo, sobretudo em remanescentes de vegetação nativa, por causa da maior concentração de carbono orgânico do solo (Lima et al., 2020). Assim, dados referentes a esses solos apresentam relevância espacial e ambiental significativa.

Avanços expressivos foram alcançados na quantificação dos estoques de carbono orgânico do solo, nitrogênio total do solo e do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no bioma Caatinga (Santana et al., 2019; Lima et al., 2020; Santos et al., 2020; Dos Santos et al., 2021; Menezes et al., 2021). No entanto, os estoques de carbono orgânico do solo, nitrogênio total do solo e do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo dentro deste bioma são altamente variáveis mesmo em escala local, de modo que a contabilização dessa variabilidade é um dos maiores desafios para obter estimativas confiáveis. A contabilização da variabilidade é ainda mais crítica para solos que apresentam fragmentos de rocha no perfil, como os Luvisolos, Neossolos Regolíticos e Litólicos, pelas alterações na densidade do solo e na concentração de carbono orgânico (Fraga e Salcedo, 2004; Jandl et al., 2014), além da profundidade do solo irregular.

Portanto, informações sobre a variabilidade espacial em escala local dos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, acentuada por variações na profundidade do solo e épocas de amostragem, são essenciais na implementação de pesquisas para monitorar os fluxos desses elementos no bioma Caatinga. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo geral avaliar a variabilidade dos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e do efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolo Litólico sob Caatinga. Para isso, dividiram-se as informações produzidas, em dois capítulos:

No capítulo I: “Variabilidade dos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga” levantou-se a hipótese de que existe variabilidade vertical e horizontal nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, porque esses estoques são influenciados por atributos físicos e químicos do solo. Os objetivos foram avaliar a variabilidade vertical e horizontal dos estoques COS e NTS de Neossolos sob floresta de Caatinga e determinar suas relações com os atributos físicos e químicos do solo.

No capítulo II: “Variabilidade temporal e espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> de um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga” foi levantada a hipótese de que há variabilidade espacial e temporal do ECO<sub>2</sub> do solo, porque a atividade autotrófica e heterotrófica que compõem o ECO<sub>2</sub> do solo são afetadas por fatores ambientais como temperatura do solo, umidade do solo, porosidade total do solo, granulometria, assim como pela distribuição do suprimento orgânico para a biomassa microbiana. Os objetivos foram avaliar a variabilidade temporal e espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> de um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga e relacioná-las com as mudanças sazonais e espaciais das variáveis ambientais e atributos do solo.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 *Caatinga a floresta tropical seca do semiárido brasileiro*

Em escala global, a Caatinga faz parte das florestas tropicais sazonalmente secas, um bioma genuinamente brasileiro que representa a quarta maior formação florestal do Brasil (Sampaio, 1995; Silva, Leal e Tabarelli, 2017). É um dos três espaços semiáridos da América do Sul (Ab'Sáber, 2003), considerado o principal ecossistema da região nordeste brasileira, estendendo-se pelo domínio do clima semiárido numa área de 912,529 km<sup>2</sup>, estando presente em todos os estados da região nordeste mais parte do norte de Minas Gerais (INSA, 2010; Silva, Leal e Tabarelli, 2017).

A Caatinga exhibe pelo menos 13 fisionomias diferentes abrangendo uma grande diversidade de espécies adaptadas a condição de aridez, conhecido como Caatingas (Oliveira et al., 2021). Apresentam-se tanto como áreas abertas, dominadas por espécies arbustivas e cactáceas, como também florestas com espécies arbóreas de pequeno e médio porte, arbustos e herbáceas (Queiroz et al., 2017). A vegetação é distribuída de forma irregular, contrastando áreas que se assemelham a florestas, com áreas com solo quase descoberto, nas quais as classes de solo variam muito, principalmente em função do material de origem e relevo, ocorrendo desde solos com alto grau de intemperização como Latossolos e Argissolos até solos pouco desenvolvidos, como os Neossolos, Luvisolos, Planossolos, Vertissolos e Cambissolos, que são as ordens mais frequentes no bioma Caatinga (Jacomine, 1996).

Mesmo sendo uma das maiores formações de floresta tropical sazonalmente seca, a Caatinga é considerada frequentemente como vegetação arbustiva e não floresta (Dexter et al., 2015). Isso faz com que esse bioma seja muitas vezes excluído da pesquisa e dos relatórios relevantes como, por exemplo, valores de desmatamento florestal. As estimativas sugerem que 90% da vegetação encontra-se completamente modificada, devido ao extrativismo e a agropecuária, apresentando-se em sua maioria áreas em estágio secundário de sucessão ecológica (Gariglio et al., 2010). Nessas áreas intensamente degradadas a remoção da cobertura vegetal e redução da capacidade produtiva dos solos dos provocam a deterioração das condições de vida das populações locais (Sampaio e Araújo, 2005).

Os cenários climáticos sugerem que a principal ameaça à Caatinga está no aumento da aridez, tanto pelos efeitos das mudanças climáticas como pelas atividades antrópicas de

remoção da vegetação de caatinga para a produção de carvão vegetal, que aumentam a pressão de aridificação em área de clima semiárido do Nordeste (Nobre, 2011).

## *2.2 Estoques de carbono orgânico e nitrogênio total de solos sob Caatinga*

Embora ocupe um vasto território, pesquisas quantificando os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em solos do bioma Caatinga ainda são escassos e os poucos estudos publicados até o momento incluem informações um tanto limitadas, como por exemplo, quantificação dos estoques apenas na camada superior de 20 ou no máximo 30 cm de profundidade (Menezes et al., 2021). Desse modo, os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total encontrados em Latossolo vermelho de textura argilosa sob Caatinga foram, respectivamente, de 90 e 10 Mg ha<sup>-1</sup>, na camada de 0-30 cm de profundidade (Fracetto et al., 2012). Em Argissolo os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total foram de aproximadamente 22,1 e 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> em 0-20 cm de profundidade, respectivamente (Ferreira et al., 2016).

Os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em Neossolo Quartzarênico sob floresta secundária de Caatinga foram de 27,6 e 2,4 Mg ha<sup>-1</sup>, na camada de 0-40 cm, respectivamente (Bernardi et al., 2007). Em Luvissole sob vegetação de Caatinga, Sacramento et al. (2013) descobriram estoques de carbono orgânico e nitrogênio total, na devida ordem, de 134,65 e 5,65 Mg ha<sup>-1</sup> em 0-40 cm de profundidade. Barros et al. (2015), encontraram estoques de carbono e nitrogênio total, respectivamente, de 46,5 e 4,38 Mg ha<sup>-1</sup> para Caatinga nativa sobre Vertissolo, a uma profundidade de solo de 0-40 cm. Para essa mesma classe de solo também sob Caatinga nativa, Aquino et al. (2017) descobriram estoque de 50,1 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono orgânico e de 4,2 Mg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio total, em 0-60 cm de profundidade.

Em mosaico de Planossolos, Luvissoles, Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico sob vegetação de Caatinga preservada (Schulz et al., 2016) encontraram estoques de carbono orgânico e nitrogênio total de 22,84 e 2,16 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, até 0-60 cm de profundidade. Esses mesmos autores constataram ainda que a altitude e o conteúdo de argila foram correlacionados positivamente com o estoque de carbono orgânico, porém a relação com o estoque de nitrogênio total não foi avaliada. Em uma associação de Planossolos com Neossolos Litólicos o estoque de carbono orgânico foi de 57,6 Mg ha<sup>-1</sup> e o de nitrogênio total de 7,2 Mg ha<sup>-1</sup>, nos primeiros 40 cm de profundidade (Oliveira Filho et al., 2019).

Em Neossolo Litólico sob vegetação de Caatinga com diferentes estádios de regeneração, Moura et al. (2016) encontraram estoques de 21,76 e 22,39 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono orgânico e de 1,82 e 2,03 Mg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio total, em Caatinga com um e quinze de regeneração natural em 0-20 cm de profundidade, respectivamente. No entanto, em estádios de regeneração mais avançados com 37 e 57 anos os estoques de carbono orgânico foram de 36,66 e 30,21 Mg ha<sup>-1</sup> e os de nitrogênio total de 3,07 e 2,76 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Ainda em Neossolo Litólico sob Caatinga, Andrade et al. (2020) observaram estoque de 7,8 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono orgânico e 0,52 Mg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio total nos primeiros 30 cm de profundidade.

Esforços recentes foram realizados no sentido de quantificar os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total até 100 cm de profundidade, ou até o contato lítico em diferentes classes de solo e usos da terra na região semiárida brasileira. Neste seguimento, Santana et al. (2019) descobriram que em Caatinga densa os estoques médios de carbono orgânico e nitrogênio total foram, respectivamente, 98,3 e 8,6 Mg ha<sup>-1</sup> para Argissolos, 72,1 e 5,8 Mg ha<sup>-1</sup> para Latossolos, 54,5 e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> para Neossolo Litólico e 27,7 e 3,1 Mg ha<sup>-1</sup> para Planossolos. Em uma pesquisa mais ampla, Menezes et al. (2021) e Dos Santos et al. (2021), encontraram em Caatinga densa estoques médios de carbono orgânico e nitrogênio total de 147,9 e 13,3 Mg ha<sup>-1</sup> para Neossolo Quartizarênico, 125,4 e 11,7 Mg ha<sup>-1</sup> para Neossolo Regolítico, 117,6 e 10,9 Mg ha<sup>-1</sup> para Argissolos, 88,7 e 8,1 Mg ha<sup>-1</sup> para Planossolos, 76,2 e 6,2 Mg ha<sup>-1</sup> para Latossolos, 69,3 e 7,3 Mg ha<sup>-1</sup> para Luvisolos e 65,4 e 6,2 Mg ha<sup>-1</sup> para Neossolo Litólico.

### 2.3 Efluxo de CO<sub>2</sub> de solos sob Caatinga

Apesar da relevância do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo no ciclo global de carbono e dos avanços na pesquisa sobre o tema (Stockmann et al., 2013), no bioma Caatinga informações sobre a quantificação do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo ainda são um tanto quanto limitadas. A maioria das pesquisas objetivando quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> *in-situ* em área de Caatinga foi realizada utilizando a técnica da câmara estática com armadilha alcalina para capturar o CO<sub>2</sub> emitido. Essa técnica destaca-se por ser considerada um método simples, de baixo custo e sensível que pode ser aplicado simultaneamente em muitos pontos, e que pode integrar as evoluções de CO<sub>2</sub> ao longo de muitas horas (até 24 horas) (Ferreira et al., 2018).

Nesse sentido, Aquino et al. (2017) observaram que o efluxo de CO<sub>2</sub> médio diurno em Vertissolo sob Caatinga foi de 108,3 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> enquanto o noturno foi de 105,2 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Em um remanescente de Caatinga sobre uma associação de Luvisolo e

Neossolo Litólico, Holanda et al. (2015) descobriram efluxo de CO<sub>2</sub> médio diurno de 119,72 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> e de 169,36 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> noturno. Avaliando o efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolo Litólico sob diferentes estágios sucessionais de Caatinga, Correia et al. (2015) constataram que o efluxo médio diurno de CO<sub>2</sub> do solo em Caatinga preservada há 50 anos foi de 118,43 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> ao passo que o noturno foi de 141,70 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Além disso, todos os autores supracitados encontraram maiores efluxos de CO<sub>2</sub> do solo na estação chuvosa do que na estação seca.

Ao longo de uma topossequência sob Caatinga, Santos et al. (2020) observaram que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo variou entre 123,78 e 147,67 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Esses mesmo autores constataram ainda que os efluxos de CO<sub>2</sub> solo foram maiores durante o período da noite e apresentou correlação positiva com a umidade do solo. Em Planossolo Háplico, Martins (2012) observou que o efluxo médio de CO<sub>2</sub> de variou entre 348 a 98 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> e 207 a 75 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> para Caatinga densa e Caatinga aberta, respectivamente. Enquanto em um Neossolo Litólico, Costa (2019) constatou que o efluxo de CO<sub>2</sub> sob Caatinga densa oscilou entre 395 a 97 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> e entre 457 a 114 mg C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> em Caatinga aberta.

A técnica da câmara estática com armadilha de alcalina foi comparada a medição dinâmica feita com um analisador de gás infravermelho (IRGA) em solos sob Caatinga e Pastagem (Ferreira et al., 2018). Os autores observaram que as variações mensais do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo obtidos pela armadilha alcalina foram pequenas, tanto para medidas diurnas e noturnas quanto para Caatinga e pastagem. Já os valores obtidos pelo IRGA também foram semelhantes para os períodos diurno e noturno e em ambas as áreas, mas diferiram significativamente entre os períodos chuvoso e seco, tanto na Caatinga quanto nas áreas de pastagem. Os autores concluíram que a armadilha alcalina parece ter pouca sensibilidade às variações sazonais, ao contrário das medidas do IRGA, e pode subestimar o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo quando atinge valores mais elevados, indicando que alguns dos valores de efluxo de CO<sub>2</sub> do solo determinados em áreas do semiárido brasileiro podem ter sido subestimadas.

Nessa perspectiva, Souza et al. (2019) quantificando o efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolo sob Caatinga com um IRGA descobriram que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo variou entre 4,78 e 0,38 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e que o maior valor médio efluxo de CO<sub>2</sub> de 2,49 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> coincidiu com a maior umidade do solo, enquanto o menor valor médio de 0,72 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> foi associado com a menor umidade do solo. Os autores concluíram que a umidade do solo e não a temperatura é o principal impulsionador das emissões de CO<sub>2</sub> do solo, o que é de fato característico de ecossistemas semiáridos.

Utilizando o IRGA para quantificar e comparar as variações sazonais do efluxo de CO<sub>2</sub> em Luvissole Crômico sobre a Caatinga e pastagens degradadas, Lima et al. (2020) observaram que os efluxo de CO<sub>2</sub> do solo variou de 5,87 a 0,42  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com média de 2,10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na Caatinga. Os autores constataram também uma relação negativa entre a temperatura do solo e o efluxo de CO<sub>2</sub> e uma relação positiva entre a umidade do solo e o efluxo de CO<sub>2</sub> para ambos os usos da terra. No entanto, umidade do solo foi um preditor melhor do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo do que a temperatura do solo, de acordo com o maior valor do coeficiente de determinação.

É possível que existam dados adicionais em publicações não indexadas e em dissertações e teses, mas de toda forma, fica evidente a necessidade de mais pesquisas nesse tema específico, visando não só um maior conhecimento dos solos do país, mas também contribuindo como fonte de dados para o monitoramento global.

#### *2.4 Análise geoestatística de atributos do solo*

Solos sob vegetação natural apresentam variabilidade em seus atributos, resultante dos processos de formação, tais atributos variam tanto no sentido horizontal como no vertical (Artur et al., 2014). Na escala de paisagem, a variabilidade horizontal dos atributos do solo ocorre por causa das diferenças nas classe de solo, textura e redistribuição do material do solo. Já na escala de pedon, a variabilidade vertical ocorre como resultado de processos pedogenéticos como transformações, translocações, adições e remoções de materiais, energia e organismos (VandenBygaart et al., 2007). Pelo fato de o solo apresentar naturalmente, grande heterogeneidade em seus atributos em curtas e longas distâncias, podendo ou não, apresentar forte dependência espacial (Sepaskhah et al., 2005), é indispensável sua compreensão para entender outros processos.

De acordo com Campos et al. (2008), uma adequada descrição da dependência espacial é fundamental para revelar tanto o grau de continuidade espacial de um atributo quanto a sua estrutura de variação. A verificação de existência de dependência espacial dos atributos do solo pode ser realizada por meio ferramentas como a geoestatística através de modelos ajustados de semivariogramas, que descrevem a estrutura de dependência espacial do fenômeno estudado, apresentando muitas informações no seu conjunto gráfico. De maneira geral, para que possa ser realizada a análise geoestatística os modelos de semivariogramas devem atender a hipótese de estacionariedade de segunda ordem, sendo avaliados os seguintes

parâmetros do modelo: contribuição, efeito pepita, patamar e alcance (Seidel et al., 2014). Em adição, Cambardella et al. (1994) sugerem uma medida de dependência espacial que relaciona o parâmetro efeito pepita com o parâmetro patamar.

Em uma floresta tropical do sudeste asiático, Kosugi et al. (2007) viram que a autocorrelação espacial para a taxa de respiração do solo variou entre 4,4 m no período chuvoso e 24,7 m no período transitório, apresentando uma forte dependência espacial. A autocorrelação espacial da respiração do solo variou, dentro de 33 m (outono), 12 m (inverno) e 80 m (verão), com forte dependência espacial em uma floresta de cedro japonês (Ohashi e Gyokusen, 2007). Já Adachi et al. (2009), descobriram que a respiração do solo não mostrou qualquer autocorrelação espacial em uma floresta tropical sazonalmente seca da Tailândia.

Em florestas tropicais do sudeste da Tanzânia, Rossi et al. (2009) descobriram, por meio de técnicas geoestatísticas, que os estoques de carbono orgânico do solo apresentaram dependência espacial moderada na floresta de miombo e floresta costeira, mas a plantação de pinheiros não apresentou estrutura espacial. Em estudo na região semiárida da África, Woollen et al. (2012) observaram que os estoques de carbono orgânico do solo nos 5 cm superiores e nas profundidades de 30 cm tiveram forte dependência espacial em escalas de poucos metros, com distância de autocorrelação 14 m em 0-5 cm e 26 m no intervalo de 0-30 cm.

Avaliando o efeito da umidade do solo no padrão espacial da respiração do solo em um ecossistema semiárido, Fóti et al. (2014) observaram que os intervalos de autocorrelação espacial variaram entre 0,0 m e 3,6 m para respiração do solo, 3 m para umidade do solo e 2,9 m para temperatura do solo. Além disso, as três variáveis tiveram grau de dependência espacial de moderada a forte. Também em ecossistema semiárido, Leon et al. (2014) constataram que a dependência espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo mudou entre duas estações contrastantes (seca e úmida). Por outro lado, o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em uma floresta mista teve dependência espacial fraca (Acosta et al., 2017).

Ao longo de uma encosta sob pastagem, Haruna (2021) descobriu que a distância de autocorrelação de variou entre 5,8 e 71,0 m para elementos nutrientes (P, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fe e Mn), entre 6,7 e 69,9 m para o pH do solo, entre 19 e 71,0 m para densidade do solo, enquanto a concentração de carbono orgânico do solo ficou em 19 m. O autor descobriu ainda que o grau de dependência espacial de todos os elementos nutrientes foi forte, sugerindo que, apesar das posições de declive, a autocorrelação espacial do elemento nutriente depende mais das características texturais e mineralógicas do que do manejo do solo. Em turfeiras altamente degradadas o conteúdo de matéria orgânica mostrou-se fortemente dependente no espaço

(Wang et al., 2021). Por outro lado, as concentrações de carbono orgânico no solo e em suas frações apresentaram dependência espacial moderada em uma floresta tropical montana (Liu et al., 2021).

Em florestas subtropicais do sudeste da China, Dong et al. (2021) constataram dependência espacial moderada para a concentração de carbono orgânico do solo, nitrogênio total e relação C:N. Os autores observaram ainda um aumento gradual da dependência espacial com o aumento da profundidade do solo. Do mesmo modo, Cao et al. (2021) estudando a distribuição espacial do carbono orgânico e nitrogênio total do solo em uma região semiárida da China observaram que os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total apresentaram dependências espaciais moderadas em profundidades de solo de 0,2-0,4 m e 0,4-1 m, mas em maiores profundidades de solo (1-3 m) as dependências espaciais eram mais forte.

## 2. REFERÊNCIAS

- Ab'Sáber, A. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159p.
- Acosta, M., Darenova, E., Dušek, J., Pavelka, M., 2017. Soil carbon dioxide fluxes in a mixed floodplain forest in the Czech Republic. *European Journal of Soil Biology* 82, 35-42. doi:10.1016/j.ejsobi.2017.08.006.
- Adachi, M., Ishida, A., Bunyavejchewin, S., Okuda, T., Koizumi, H., 2009. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology* 25, 531-539.
- Ahlström, A., Raupach, M.R., Schurgers, G., Smith, B., Arneeth, A., Jung, M., Reichstein, M., Canadell, J.G., Friedlingstein, P., Jain, A.K., et al., 2015. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO<sub>2</sub> sink. *Science* 348, 895-899. doi:10.1126/science.aaa1668.
- Almeida, A.Q., Souza, R.M.S., Loureiro, D.C., Pereira, D.R., Cruz, M.A.S., Vieira, J.S., 2017. Modelagem da dependência espacial do índice de erosividade das chuvas no semiárido brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 52, 371-379.
- Andrade, E.M., Valbrun, W., Almeida, A.M.M., Rosa, G., Silva, A.G.R., 2020. Land-Use Effect on Soil Carbon and Nitrogen Stock in a Seasonally Dry Tropical Forest. *Agronomy* 10, 158. doi:10.3390/agronomy10020158.
- Aquino, D.N., Andrade, E.M., Almeida Castanho, A.D., Pereira Júnior, L.R., Palácio, H.A.Q., 2017. Belowground Carbon and Nitrogen on a Thinned and UnThinned Seasonally Dry Tropical Forest. *American Journal of Plant Sciences* 8, 2083-2100. doi: 10.4236/ajps.2017.89140.
- Aquino, D.N., Andrade, E.M., Palácio, H.A.Q., Júnior, L.R., 2017. Nutrient cycling and CO<sub>2</sub> emissions in areas of preserved and thinned Caatinga. *Revista Árvore* 41, e410308. doi: 10.1590/1806-90882017000300008.
- Arruda, D.M., Schaefer, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Rodrigues, P.M.S., Duque-Brasil, R., Ferreira-JR, W.G., Oliveira-Filho, A.T., 2015. Landforms and soil attributes determine the

vegetation structure in the Brazilian semiarid. *Folia Geobotanica* 50, 175-184. doi:10.1007/s12224-015-9221-0.

Artur, A.G., Oliveira, D.P., Costa, M.C., Romero, R.E., Silva, M.V., Ferreira, T.O., 2014. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 141-149.

Barros, J.D.S., Chaves, L.H.G., Pereira, W.E., 2015. Carbon and nitrogen stocks under different management systems in the Paraíba "Sertão". *African Journal Agricultural Research* 10, 130-136.

Bernardi, A.C., Machado, P.L., Madari, B.E., Tavares, S., Campos, D.V., Crisostomo, L., 2007. Carbon and nitrogen stocks of an Arenosol under irrigated fruit orchards in semiarid Brazil. *Scientia Agricola* 64, 169-175.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal* 58, 1501-1511.

Campos, M.C., Junior, J.E., Pereira, G.T., Souza, Z.M., Barbieri, D.M., 2008. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas Geoestatísticas, *Ciência Rural* 38, 974-980.

Cao, Q., Li, J., Wang, G., Wang, D., Xin, Z., Xiao, H., Zhang, K., 2021. On the spatial variability and influencing factors of soil organic carbon and total nitrogen stocks in a desert oasis ecotone of northwestern China. *Catena* 206, 105533. doi:10.1016/j.catena.2021.105533.

Correia, K.G., Filho, R.N., Menezes, R.S., Souto, J.S., Fernandes, P.D., 2015. Atividade microbiana e matéria orgânica leve em áreas de Caatinga de diferentes estágios sucessionais no semiárido paraibano. *Revista Caatinga* 28, 196-202.

Costa, C.R.G. Dinâmica temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> e produção de glomalina em área de Caatinga sob Neossolo Litólico. 2019. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2019.

Dexter, K.G., Smart, B.F., Baldauf, C., Baker, T.R., Balinga, M., Brienen, R.J., Fauset, S., Feldpausch, T.R., Ferreira-Da Silva, L., Ilunga Muledi, J., et al., 2015. Floristics and biogeography of vegetation in seasonally dry tropical regions. *International Forestry Review – Special Issue: Global Dry Forests* 17, 10-32.

Dong, J., Zhou, K., Jiang, P., 2021. Revealing horizontal and vertical variation of soil organic carbon, soil total nitrogen and C:N ratio in subtropical forests of southeastern China. *Journal of Environmental Management* 289, 112483. doi:10.1016/j.jenvman.2021.11248

dos Santos, U.J., de Sá Barretto Sampaio, E.V., de Andrade, E.M., de Siqueira Pinto, A., de Oliveira Dias, B., de Jesus, K.N., da Silva Santana, M., Althoff, T.D., Fernandes, M.M., Menezes, R.S., 2021. Nitrogen Stocks in Soil Classes Under Different Land Uses in the Brazilian Semiarid Region. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21, 1621-1630. doi:10.1007/s42729-021-00466-4.

Ferreira, A.C.C., Leite, L.F.C., Araújo, A.S.A., Eisenhauer, N., 2016. Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of Northeast Brazil. *Land Degradation & Development* 27, 171-178. doi: 10.1002/ldr.2282.

Ferreira, C.R.P.C., Antonino, A.C.D., Sampaio E.V.S.B., Correia, K.G., Lima, J.R.S., Soares, W.A., Menezes, R., 2018. Soil CO<sub>2</sub> efflux measurements by alcali absorption and infrared gas analyzer in the Brazilian semiarid region. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42, e0160563. doi: 10.1590/18069657rbc20160563.

Fóti, S., Balogh, J., Nagy, Z., Herbst, M., Pintér, K., Péli, E., Koncz, P., Bartha, S., 2014. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. *Geoderma* 213, 245-254.

Fracetto, F.J., Fracetto, G.G., Cerri, C.C., Feigl, B.J., Neto, M.S., 2012. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na Caatinga. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 1545-1552.

Fraga, V.S., Salcedo, I.H., 2004. Declines of Organic Nutrient Pools in Tropical Semi-Arid Soils under Subsistence Farming. *Soil Science Society of America Journal* 68, 215-224.

Gariglio, M.A., Sampaio, E.V.S.B., Cestaro, L.A., Kageyama, P., 2010. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. p. 29-48.

Giongo, V., Cunha, T.J.S., Mendes, A.S.M., Gava, C.A., 2011. Carbono no Sistema Solo-planta no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 4, 1233-1253.

Gomes, L.D., Faria, R.M., de Souza, E., Veloso, G.V., Schaefer, C., Filho, E.I., 2019. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma* 340, 337-350. doi:10.1016/j.geoderma.2019.01.007.

Haruna, S. I., 2021. Spatial and fractal characterization of selected soil nutrients along a catena. *Catena* 204, 105443. doi:10.1016/j.catena.2021.105443.

Holanda, A.C., Feliciano, A.L.P., Marangon, L.C., Freire, F.J., Holanda, E.M., 2015. Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. *Revista Árvore* 39, 245-254. doi: 10.1590/0100-67622015000200004.

INSA – Instituto Nacional do Semiárido. 2017. Disponível em <https://portal.insa.gov.br/noticias/1070-nova-delimitação-expande-o-semiarido-ate-o-maranhao-73-novos-municipios-foram-incluidos>.

INSA – Instituto Nacional do Semiárido. 2010. Flores da Caatinga. Campina Grande PB, Brazil: Instituto Nacional do Semiárido Disponível em <https://portal.insa.gov.br/acervo-livros/189-flores-da-caatingacaatinga-flowers>.

Jacomine, P. K. T. Solos sob caatinga – características e uso agrícola. In: Alvarez, V. H.; Fontes, L. E. F.; Fontes, M.P.F. (eds.) *O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 95-111, 1996.

Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., Cotrufo, M.F., Bampa, F., van Wesemael, B., Harrison, R.B., Guerrini, I.A., Richter, D.D., Rustad, L.E., et al., 2014. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Science of the Total Environment* 468-9, 376-383.

Kosugi, Y., Mitani, T., Itoh, M., Noguchi, S., Tani, M., Matsuo, N., Takanashi, S., Ohkubo, S., Rahim Nik, A., 2007. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 147, 35-47.

Leon, E., Vargas, R., Bullock, S., Lopez, E., Panosso, A. R., La Scala, N., 2014. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO<sub>2</sub> efflux in a water-limited ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 77, 12-21. doi:10.1016/j.soilbio.2014.05.029.

Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Santos, E.S., Souza, E.S., Oliveira, J.E.S., Medeiros, E.V., Pessoa, L.G.M., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., 2020. Impacts of land use changes on

soil respiration in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44, e0200092. doi:10.36783/18069657rbcs20200092.

Liu, W., Jiang, Y., Yang, Q., Huai, Y., Li, Y., Li, Z., Mao, W., Luo, Y., Wang, X., Tan, Z., 2021. Spatial distribution and stability mechanisms of soil organic carbon in a tropical montane rainforest. *Ecological Indicators*, 129, 107965. doi:10.1016/j.ecolind.2021.107965.

Martins, E. L. Variação sazonal de estoques e fluxos de nutrientes em áreas sob caatinga e pastagem em solo da região semiárida. 2012. 52p. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo e Água) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012.

Mendes, K.R., Campos, S., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.D., Perez-Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., de Lima Vieira, M.M., et al., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports* 10, 9454. doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w.

Menezes, R.S., Sales, A.T., Primo, D.C., Albuquerque, E.R., Jesus, K.N., Pareyn, F.G., Santana, M.D., Santos, U.J., Martins, J.C., Althoff, T.D., et al., 2021. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma* 390, 114943. doi:10.1016/j.geoderma.2021.1149.

Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Giongo, V., Perez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology* 72, 643-653.

Moura, P.M., Althoff, T.D., Oliveira, R.A., Souto, J.S., Souto, P.C., Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., 2016. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 105, 25-38.

Nobre, P. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro. In: *Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido*. 1ª Ed. Lima, R. C. C.; Cavalcante, A. M. B.; Perez-Marin, A. M. (Eds). Campina Grande: INSA-PB, p. 25-35, 2011.

Ohashi, M., Gyokusen, K., 2007. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 1130-1138. doi:10.1016/j.soilbio.2006.12.021.

Oliveira Filho, J.S., Vieira, J.N., Silva, E.M.R. da., Oliveira, J.G.B., Pereira, M.G., Brasileiro, F.G., 2019. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. *Journal of Arid Environments* 166, 1-10. doi:10.1016/j.jaridenv.2019.03.006.

Oliveira, M.K., Ferreira, E.A., Almeida, N.V., Silva, E.F., Vasconcelos, A.D., 2021. Dinâmica Espaço-Temporal da Paisagem Semiárida no Município de Apodi/RN e seus Condicionantes Socioeconômicos e Ambientais. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 2446-2464.

Plaza, C., Zaccane, C., Sawicka, K.M., Méndez, A., Tarquis, A.M., Gasco, G.R., Heuvelink, G.B., Schuur, E.A., Maestre, F.T., 2018. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. *Scientific Reports* 8, 13788. doi:10.1038/s41598-018-32229-0.

Queiroz, L.P., Cardoso D., Fernandes, M.F., Moro, M. F., 2017. Diversity and Evolution of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In: Silva, J.M.C.; Leal, I.R.; Tabarelli, M. *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*. Springer, p. 23-63.

Rossi, J., Govaerts, A., De Vos, B., Verbist, B., Vervoort, A., Poesen, J., Muys, B., Deckers, J., 2009. Spatial structures of soil organic carbon in tropical forests-A case study of Southeastern Tanzania. *Catena* 77, 19-27. doi:10.1016/j.catena.2008.12.003.

Sacramento, J.A., Araújo, A.C.M., Escobar, M.E., Xavier, F.A.S., Cavalcante, A.C.R., Oliveira, T.S., 2013. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 784-795.

Sampaio, E. V. S. B, Araújo, M. S. Desertificação no nordeste semiárido. In: Nogueira, R. J. M.; Araújo, E. L.; Willadino, L. G.; Cavalcante, U. M. T (Eds) *Estresses Ambientais: Danos e Benefícios em Plantas*, MXM Gráfica e Editora, Recife, p, 490-499, 2005.

Sampaio E. V. S. B. Overview of the Brazilian Caatinga. In: Bullock, S.; Mooney, H. A.; Medina, E (Eds) *Seasonally Dry Tropical Forests*, Cambridge University Press, New York, pp 35-58, 1995.

Santana, M.S., de Sá Barretto Sampaio, E.V., Giongo, V., Menezes, R.S.C., de Jesus, K.N., de Albuquerque, E.R.G.M., do Nascimento, D.M., Pareyn, F.G.C., Cunha, T.J.F., Sampaio, R.M.B., et al., 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. *Geoderma Regional*, e00205. doi:10.1016/j.geodrs.2019.e00205.

Santos, É. M. da C., Araújo, K. D., Souza, M. A., Gomes, D. L., Lira, E. dos S., Guimarães Júnior, S. A. M., Costa, J. G. da., 2020. Relief and edaphoclimatic conditions as influencing agents of CO<sub>2</sub> release in Alagoas Caatinga, Brazil. *Soil Research* 58, 306-313. doi:10.1071/sr19156.

Schulz, K., Voigt, K., Beusch, C., Almeida-Cortez, J.S., Kowarik, I., Walz, A., Cierjacks, A., 2016. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *Forest Ecology and Management* 367, 62-70. doi:10.1016/j.foreco.2016.02.011.

Seidel, E.J., Oliveira, M.S., 2014. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 699-705.

Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., Nikbakht Shahbazi, A.R., 2005. Geostatistical analysis of sortivity for a soil under tilled and no-tilled conditions. *Soil Tillage Research* 83, 237-245.

Silva J.M.C., Leal I.R., Tabarelli M., 2017. Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America. Switzerland, Springer International Publishing.

Souza, R.F.S., Lima Felix., V.J., Martins, E.M., Fraga, V.S., Dias, B.O., Reverter, B.R., Antonino, A.C.D., 2019. A preliminary study of soil respiration from a semiarid ecosystem of Caatinga at northeast Brazil. In: 21WCSS: Proceedings of the 21st World Congress of Soil Science; 2018, August 12-17; Rio de Janeiro, Brazil: SBCS. Vol. II, p.479.

Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., Coucerlles, V.R., Singh, K., et al., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164, 80-99. doi:10.1016/j.agee.2012.10.001

UNEP – United Nations Environment Programme. (1997). World atlas of desertification, 2nd edn. United Nations Environment Programme, Nairobi.

VandenBygaart, A.J., Gregorich, E.G., Angers, D.A., McConkey, B.G., 2007. Assessment of the lateral and vertical variability of soil organic carbon. *Canadian Journal of Soil Science* 87, 433-444.

Wang, M., Liu, H., Lennartz, B., 2021. Small-scale spatial variability of hydro-physical properties of natural and degraded peat soils. *Geoderma* 399, 115123. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115123.

Woollen, E., Ryan, C.M., Williams, M., 2012. Carbon Stocks in an African Woodland Landscape: Spatial Distributions and Scales of Variation. *Ecosystems* 15, 804-818. doi: 10.1007/s10021-012-9547-x.

## **CAPÍTULO I**

### **VARIABILIDADE DOS ESTOQUES DE CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL EM NEOSSOLOS PEDREGOSOS SOB FLORESTA DE CAATINGA**

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Variabilidade dos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga**. 2021. 30p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

## RESUMO

Os solos pedregosos são típicos do semiárido brasileiro e apresentam características distintas que ocasionam grande variabilidade e dificultam a quantificação dos estoques de carbono orgânico do solo (COS) e nitrogênio total do solo (NTS). Assim, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial dos estoques de COS e NTS em Neossolos pedregosos sob Caatinga, e determinar suas relações com os atributos físicos e químicos do solo. A pesquisa foi realizada na estação experimental Professor Ignácio Salcedo, do Instituto Nacional do Semiárido em Campina Grande, Paraíba, Brasil, em uma área de vegetação de Caatinga conservada. Foram coletadas 363 amostras de solos em camadas de 10 cm de espessura, até a profundidade de 50 cm, seguindo um modelo de amostragem cíclica em um transecto de 350 m. A distância de autocorrelação espacial dos estoques de COS e NTS variou, respectivamente, de 49,63 a 72,32 m e de 48,98 a 70,23 m. As razões efeito pepita/patamar indicaram uma moderada dependência espacial para ambos os estoques nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, e forte nas demais camadas. Os conteúdos de fragmentos rocha, argila,  $P_{\text{extraível}}$ , COS e NTS, influenciam os estoques de COS e NTS, e essa influência varia com a camada do solo. Na camada de 0-50 cm, o estoque de COS oscilou entre 20,23 e 94,78 Mg ha<sup>-1</sup> e o de NTS entre 1,48 e 8,37 Mg ha<sup>-1</sup>. Para avaliar os estoques de COS e NTS em solos pedregosos deve-se adotar a distância mínima de 73 m entre os pontos de amostragem, para garantir a independência das amostras.

**Palavras-chave:** semiárido brasileiro; solos pedregosos; atributos do solo; autocorrelação e dependência espacial.

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Variability of organic carbon and total nitrogen stocks in stony Leptosol under Caatinga forest.** 2021. 30p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

### ABSTRACT

The stony soils are typical of the Brazilian semiarid region and have distinct characteristics that cause great variability and make it difficult to quantify soil organic carbon (SOC) and total soil nitrogen (TSN) stocks. Thus, the objective was to evaluate the spatial variability of SOC and TSN stocks in stony Leptosol under Caatinga, and to determine their relationships with the physical and chemical soil attributes. The study was carried out at the Professor Ignácio Salcedo experimental station, at Instituto Nacional do Semiárido in Campina Grande, Paraíba, Brazil, in an area of conserved Caatinga vegetation. A total of 363 soil samples were collected in 10 cm layers thick, up to a depth of 50 cm, following a cyclic sampling model in a 350 m transect. The spatial autocorrelation distance of the SOC and TSN stocks ranged, respectively, from 49.63 to 72.32 m and from 48.98 to 70.23 m. The ratios nugget effect/sill indicated a moderate spatial dependence for both stocks in the 0-10 and 10-20 cm layers, and strong in the other layers. The rock fragments contents, clay,  $P_{\text{extractable}}$ , SOC and TSN influence the COS and NTS stocks, and this influence varies with the soil layer. In the 0-50 cm layer, the SOC stock ranged between 20.23 and 94.78 Mg ha<sup>-1</sup> and that of TSN between 1.48 and 8.37 Mg ha<sup>-1</sup>. To assess the SOC and TSN stocks in stony soils, a minimum distance of 73 m between the sampling points must be adopted, to ensure the samples independence.

**Keywords:** brazilian semiarid; stony soil; soil attributes; autocorrelation and spatial dependence

## 1. INTRODUÇÃO

O carbono orgânico do solo (COS) e o nitrogênio total do solo (NTS) são componentes essenciais nos ciclos globais do carbono e nitrogênio (Batjes et al., 1996; Jobbagy e Jackson, 2000), e desempenham um papel importante no âmbito da mudança climática global por influenciar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (Wang et al., 2017; Zhou et al., 2021). Por essa razão, nos últimos anos muitos estudos objetivaram quantificar os reservatórios de COS e NTS em diferentes regiões e ecossistemas (Lozano-García et al., 2016; Were et al., 2016; Zhang et al., 2018; Cao et al., 2021).

Os estoques de COS e NTS são influenciados pelo clima (Jobbagy e Jackson, 2000), vegetação (Luyssaert et al., 2008), material de origem (Barré et al., 2017), topografia (Lozano-Garcia et al., 2016), propriedades do solo (Li et al., 2020) e perturbações antrópicas (Jackson et al., 2017). Tais fatores e suas interações variam amplamente no tempo e no espaço, introduzindo grande variabilidade nos estoques de COS e NTS, em diferentes profundidades do solo e em diferentes escalas espaciais (VandenBygaert et al., 2007). Como consequência, a quantificação precisa e acurada dos estoques COS e NTS é uma tarefa complexa, sobretudo para solos localizados em vertentes por possuírem uma maior geodiversidade (Kunkel et al., 2011; Prietzel e Wiesmeier, 2019).

A variabilidade espacial avaliada por meio de estatística clássica inclui medidas de momentos estatísticos e a distribuição de valores de amostra em torno de uma média (Gonzalez e Zak, 1994; Haruna et al., 2021). Embora importantes, medidas de momentos estatísticos não são capazes de informar sobre a correlação espacial entre as amostras de solo de um determinado local (Haruna, 2021). Por essa razão, técnicas de geoestatística como semivariogramas têm sido amplamente utilizadas para descrever a dependência espacial de inúmeros atributos do solo (Souza et al., 2017; Wang et al., 2021). Nesse sentido, dependência espacial de forte a moderada foi encontrada para atributos físicos e químicos do solo em encostas sob diferentes coberturas, com destaque para nutrientes (P, K, N, Fe e Mn), CTC, pH do solo, COS e granulometria (Nie et al., 2019; Haruna, 2021).

Enquanto a dependência espacial de alguns atributos do solo foi determinada em escala local de encosta, pouco se sabe sobre a dependência espacial dos estoques de COS e NTS, especialmente em encostas de solos pedregosos. Provavelmente, isso se deve ao fato de que encostas de solos pedregosos estão posicionadas muitas vezes em locais de difícil acesso dificultando a amostragem, e consequentemente a obtenção dos dados. Em adição, a quantificação do conteúdo de fragmentos de rochas e a medição da densidade do solo,

essenciais para quantificação dos estoques de COS e NTS, raramente é realizada em solos pedregosos devido demandar tempo e esforço significativo (Román-Sánchez et al., 2018; Jiang et al., 2021). No entanto, solos pedregosos são mundialmente distribuídos, logo, é importante conhecer a variabilidade espacial de seus estoques de COS e NTS para obter estimativas confiáveis dos estoques globais de COS e NTS (Liao et al., 2019; Jiang et al., 2021).

Solos pedregosos são típicos da região semiárida do Brasil (Arruda et al., 2015). Neossolos Litólicos que são normalmente associados a uma elevada pedregosidade e rochividade cobrem cerca 19% do semiárido brasileiro ( $\approx 214.311,07 \text{ km}^2$ ), sendo a segunda classe de solo mais representativa (Jacomine, 1996). Estes solos ocorrem predominantemente em áreas com relevo ondulado, forte ondulado ou montanhoso ao longo de amplas vertentes, geralmente sob vegetação de Caatinga (Macedo et al., 2021). Logo, encostas de solos pedregosos sob Caatinga são áreas de referência do semiárido brasileiro.

Diante do exposto, objetivou-se com esta pesquisa: a) quantificar e avaliar a variabilidade espacial dos estoques de COS e NTS ao longo de uma encosta com solos pedregosos; b) determinar a autocorrelação e dependência espacial dos estoques de COS e NTS ao longo de uma encosta de solos pedregosos; e c) avaliar as relações dos estoques de COS e NTS com os atributos físicos e químicos do solo. Devido às diferenças nos atributos físicos e químicos do solo ao longo de uma encosta, levantou-se a hipótese de que estoques de COS e NTS irão variar ao longo da encosta.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na estação experimental Professor Ignácio Salcedo, no Instituto Nacional do Semiárido (7° 16' 47,46" S, 35° 58' 29,50" O), município de Campina Grande, Paraíba, Brasil. A região tem clima semiárido (Alvares et al., 2013), temperatura média anual de 28,7 °C. Com base nos dados da estação meteorológica, localizada a aproximadamente 1 km da área, durante o período de 2008 a 2018 a precipitação média anual foi de 478 mm, concentrada entre os meses de abril e julho.

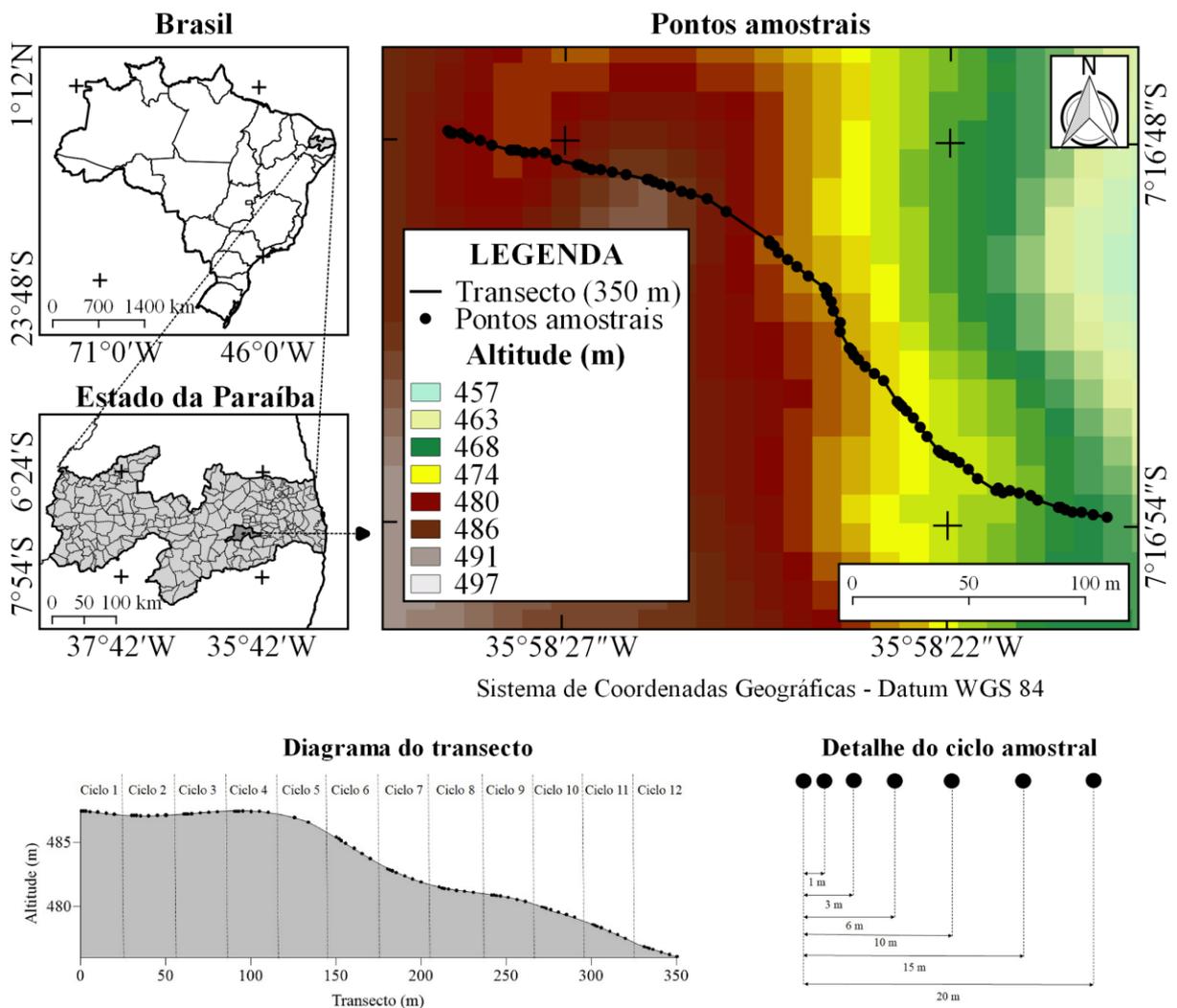
A área pertence à unidade geoambiental do Planalto da Borborema, formada por maciços e outeiros altos (Brasil, 1972), com elevações entre 464 a 499 m. Está inserida na unidade litoestratigráfica Complexo São Caetano, constituído por gnaisses e rochas metavulcânicas félsicas e intermediárias, que datam do Mesoproterozóico, com relevo local variando de suave ondulado a ondulado (Brasil, 1972). A fitofisionomia local corresponde a um fragmento de floresta tropical seca sob regeneração há aproximadamente 40 anos. Predominam nessa área as espécies arbóreas catingueira (*Cenostigma pyramidale*), mororó (*Bauhinia cheilantha*), maniçoba (*Manihot glaziovii*) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), enquanto no estrato herbáceo é composto predominantemente por picão-preto (*Bidens pilosa*) e caroá (*Neoglaziovia variegata*) (Costa, 2019). Os solos predominantes são Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Planossolos Háplicos pouco profundos e pedregosos (EMBRAPA, 2013).

### 2.2 Amostragem de solo

A amostragem de solo para análise de variabilidade espacial dos estoques de COS e NTS, foi realizada ao longo do transecto (350 m de comprimento) (Figura 1), por meio de um projeto de amostragem cíclica (Clinger e Van Ness, 1976). O projeto de amostragem cíclica tem vantagem sobre outros métodos de amostragem, pois se desvia do espaçamento regular dos pontos de amostragem, distribuindo-os de forma mais eficiente para análises geoestatísticas, como semivariogramas, correlogramas e regressão espacial (Burrows et al., 2002). Um ciclo amostral foi caracterizado como um segmento de 20 m, no qual foram

determinados sete pontos de amostragem, distanciados 0, 1, 3, 6, 10, 15 e 20 m entre si (Figura 1).

A distância entre os ciclos de amostragem foi de 10 m, até o final do transecto, criando um total de doze ciclos que culminaram em 84 pontos de amostragem. Cinco pontos de amostragem pertencentes ao quinto ciclo de amostragem não foram amostrados por estarem localizados em um espesso depósito de tálus.



**Figura 1.** Localização da área e diagrama de amostragem cíclica mostrando os pontos de amostragem ao longo de um transecto de 350 m de comprimento em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga.

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade. Devido a irregularidade do contato lítico foram realizadas 78 observações nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm, 67 em 30-40 cm e 62 em 40-50 cm. Sessenta amostras representando doze pontos de amostragem (um ponto por ciclo) foram

selecionadas para determinação do conteúdo de fragmentos de rocha (FR) (EMBRAPA, 2011), granulometria pelo método da pipeta (Gee e Bauder, 1986), densidade de terra fina ( $DS_{tf}$ ) pelo método da escavação e determinação do volume (Page-Dumroese et al., 1999), pH em água (1:2,5 solo:água). O  $P_{extraível}$  foi determinado por colorimetria (Murphy e Riley, 1962).

As concentrações de C e N total foram determinadas por combustão seca, usando um analisador Leco CNS 2000 (LECO Corporation). Todo C determinado foi assumido como carbono orgânico do solo (COS) devido à ausência de  $CaCO_3$  nesses solos (Brasil, 1972).

Os estoques de COS (ECOS) e NTS (ENTS) foram calculados em todas as profundidades com a equação 1 (Patton et al., 2019):

[1]

$$ECOS = COS \times DS_{tf} \times E \times (1-FR) \times 0,1$$

Onde: ECOS = estoque de COS ( $Mg\ ha^{-1}$ ); COS = concentração de COS ( $g\ kg^{-1}$ );  $DS_{tf}$  = densidade de terra fina ( $g\ cm^{-3}$ ); E = espessura do solo (cm); FR = conteúdo de fragmentos de rochas ( $> 2\ mm$ ) ( $g\ g^{-1}$ ). Da mesma forma, os estoques de NTS ( $Mg\ ha^{-1}$ ) para cada camada foram calculados substituindo a concentração de COS pela concentração de NTS na equação 1.

### 2.3 Análise dos dados

Os dados de estoques de COS e NTS foram submetidos a estatística descritiva (mínimo, máximo, média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), assimetria e curtose) e teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov). A variabilidade foi classificada de acordo com os valores do coeficiente de variação (CV), seguindo os critérios propostos Fang et al. (2012): baixo ( $CV < 10\%$ ), moderado ( $10\% \leq CV \leq 90\%$ ) e alto ( $CV > 90\%$ ). Devido à dificuldade de mensuração da densidade de terra fina ( $DS_{tf}$ ) em profundidades abaixo de 20 cm, foram elaboradas equações para estimar os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm de profundidade, com o intuito de facilitar a aquisição de dados em trabalhos futuros. Para a elaboração das equações foram utilizadas regressões lineares, e como base de dados, os valores dos estoques de COS nas camadas de 0-20 cm e 0-50 cm de profundidade, e dos estoques de NTS considerando as mesmas camadas.

A dependência espacial dos estoques de COS e NTS foi analisada por meio dos modelos geoestatístico e de semivariograma através do programa R 3.3.2 (R Core Team, 2020), utilizando o pacote geoR (Ribeiro Jr. e Diggle, 2016). A função de semivariância foi calculada para todas as direções (semivariograma isotrópico) a fim de avaliar a dependência espacial dos dados conforme a equação 2:

[2]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Onde  $\gamma(h)$  é a função de semivariograma,  $Z(x_i)$  é o valor da variável no ponto  $x_i$ ,  $Z(x_i + h)$  é o valor da variável no ponto  $x_i + h$ ,  $N(h)$  é o número de pares separados por uma distância  $h$  e  $x_i$  é uma medida da posição  $x_i$ . Os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano foram ajustados aos semivariogramas experimentais, os quais são brevemente descritos a seguir (McBratney e Webster, 1986).

Modelo isotrópico esférico

[3]

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ \frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right] & \text{para } 0 < h \leq A \\ C_0 + C & \text{para } h > A \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases}$$

Modelo isotrópico exponencial

[4]

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h}{A}\right) \right] & \text{para } 0 < h \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases}$$

Modelo isotrópico gaussiano

[5]

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h^2}{A^2}\right) \right] & \text{para } 0 < h \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases}$$

Os parâmetros dos modelos ajustados foram assim definidos (Webster e Oliver, 2001): i) efeito pepita ( $C_0$ ) reflete a variabilidade à distância zero (menor escala de extensão espacial que a resolução de dados) ou a variabilidade devido a erro de medição; ii) patamar ( $C_0 + C$ ) representa a variabilidade máxima atingida e; iii) alcance ( $A$ ) é a distância máxima na qual os estoques de COS e NTS exibem autocorrelação espacial.

O melhor modelo foi selecionado usando o teste de Jack-Knifing, que avalia a consistência dos dados estimados por interpolação (método da krigagem) com base em semivariogramas ajustados (dados experimentais). A estimativa é considerada adequada quando a média ( $\mu_{jk}$ ) e a variância ( $\sigma_{jk}$ ) do erro reduzido estão próximas de zero e um, respectivamente (Vieira et al., 2010).

O grau de dependência espacial (GDE) foi calculado a partir da razão em porcentagem entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o nível determinado pela soma do efeito pepita e variação estruturada ( $C$ ). O GDE foi classificado em grau de dependência espacial forte ( $GDE < 25\%$ ), moderado ( $25\% \leq GDE \leq 75\%$ ) e fraco ( $GDE > 75\%$ ) (Cambardella et al., 1994).

Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados usando o pacote metan (Olivoto e Lúcio, 2020), com intuito de determinar possíveis relações e a significância entre os estoques de COS e NTS com os atributos do solo avaliados. Para isto considerou-se as camadas de 0-20 e 20-50 cm como superficial e subsuperficial, respectivamente.

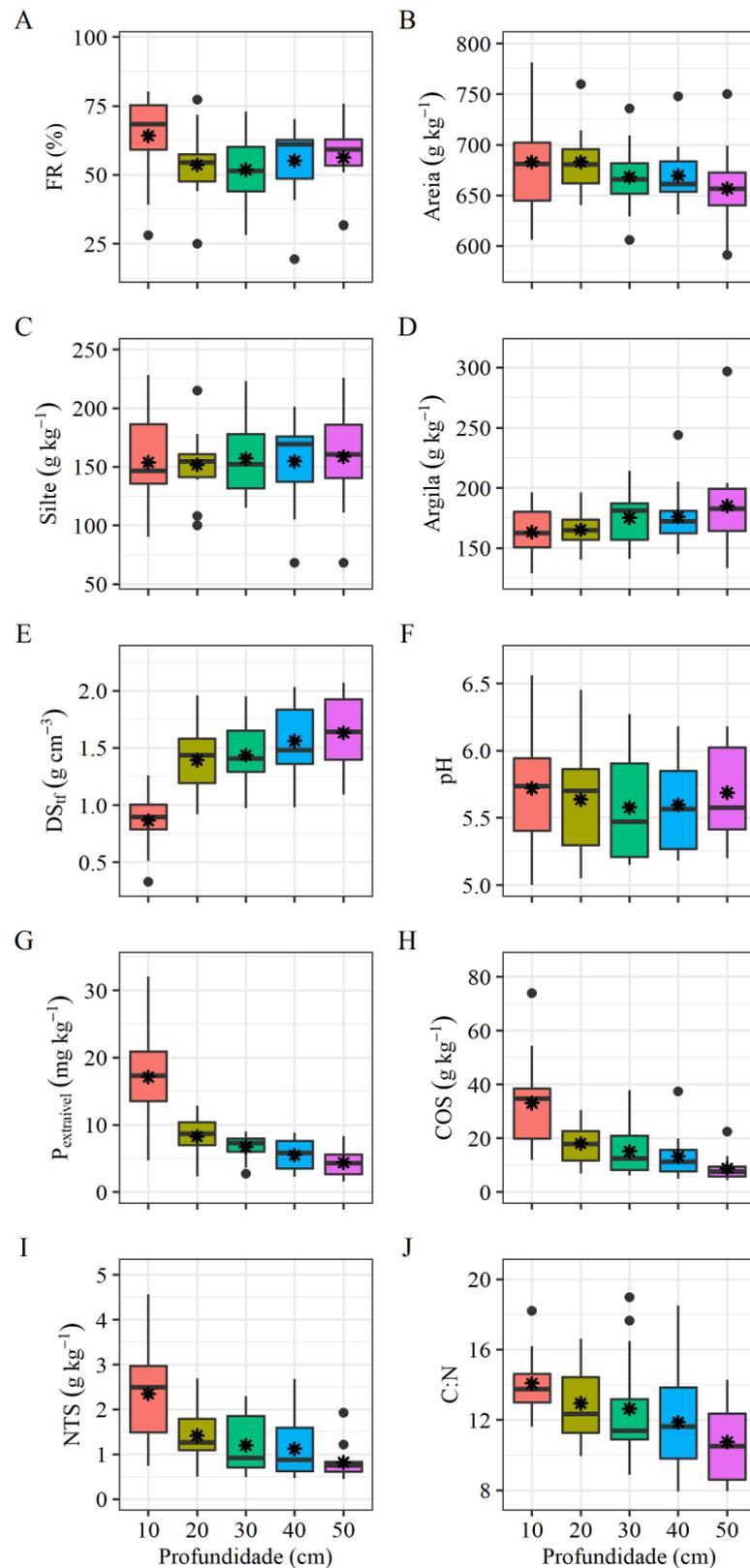
### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Atributos físicos e químicos do solo

O conteúdo médio de fragmentos de rochas (FR) foi maior na camada de 0-10 cm, decresceu até 30 cm e aumentou entre 30-50 cm, com médias superiores a 40% (massa) em todas as profundidades (Figura 2A). Além disso, a variação no conjunto de dados foi muito alta (13,2% a 80,2%). O conteúdo de areia diminuiu levemente com o aumento da profundidade do solo, oscilando entre 683 g kg<sup>-1</sup> em 0-10 cm a 657 g kg<sup>-1</sup> em 40-50 cm de profundidade (Figura 2B). O conteúdo de silte manteve-se praticamente constante ao longo do perfil do solo, com valores médios variando entre 152 a 158 g kg<sup>-1</sup> (Figura 2C). Já o conteúdo de argila aumentou de um valor médio de 163 g kg<sup>-1</sup> para 185 g kg<sup>-1</sup>, da menor para a maior profundidade do solo (Figura 2D).

A densidade da terra fina (DS<sub>tf</sub>) aumentou com o incremento da profundidade, de um valor médio de 0,86 g cm<sup>-3</sup> na camada inicial (0-10 cm) a 1,63 g cm<sup>-3</sup> na parte inferior do perfil (40-50 cm) (Figura 2E). O conjunto de dados variou amplamente, oscilando de 0,33 a 2,07 g cm<sup>-3</sup>. O pH do solo indica um caráter ácido em todas as camadas do solo, diminuiu primeiro de um valor médio de 5,72 na superfície (0-10 cm) para 5,64 no solo médio (20-30 cm) e depois aumentou para 5,68 na maior profundidade (40-50 cm) (Figura 2F). O conteúdo de P<sub>extraível</sub> decresceu com o aumento da profundidade do solo, de um valor médio de 17,12 mg kg<sup>-1</sup> na superfície (0-10 cm) para 4,38 mg kg<sup>-1</sup> na parte inferior do perfil (40-50 cm) (Figura 2G).

Da camada inicial (0-10 cm) a camada mais profunda (40-50 cm), os conteúdos médios de COS diminuíram de 33,10 a 8,83 g kg<sup>-1</sup>, e os de NTS de 2,34 a 0,82 g kg<sup>-1</sup> (Figuras 2H e 2I). Na superfície, os valores máximo e mínimo de COS foram, respectivamente, 73,92 e 11,97 g kg<sup>-1</sup>, e os de NTS 4,57 e 0,74 g kg<sup>-1</sup>. A relação C:N diminuiu de um valor médio de 14,08 para 10,74, da menor para a maior profundidade do solo (Figura 2J), acompanhado o declínio nos conteúdos de COS e NTS.



**Figura 2.** Atributos físicos e químicos do solo até 50 cm de profundidade em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. FR – conteúdo de fragmentos de rochas, DS<sub>tf</sub> – densidade de terra fina, COS – carbono orgânico do solo, NTS – nitrogênio total do solo, C:N – relação carbono nitrogênio. A linha horizontal dentro das caixas é a mediana, os pontos são outliers e os asteriscos às médias.

### 3.2 Variabilidade vertical dos estoques de COS e NTS

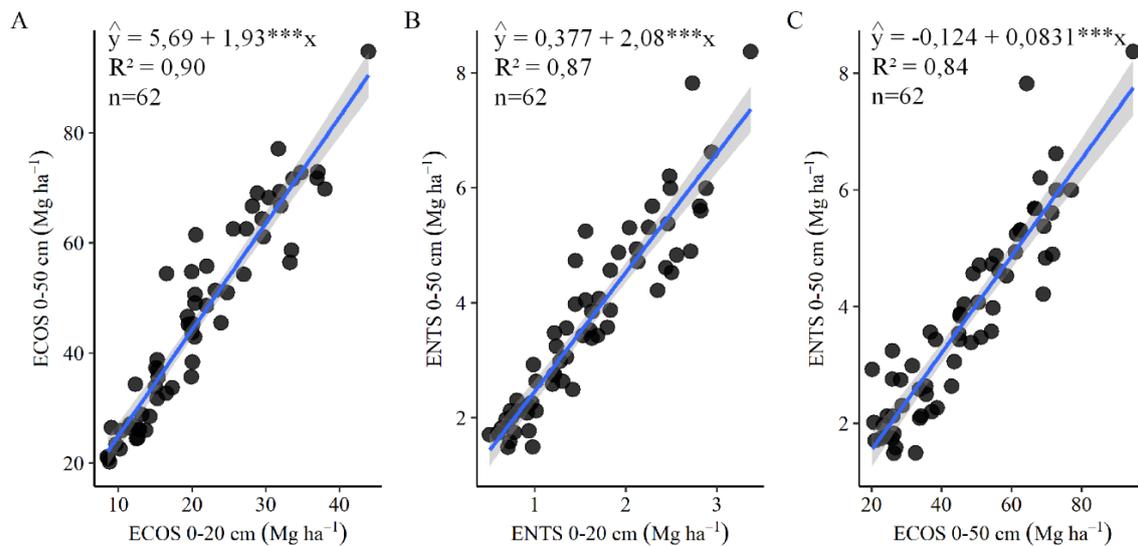
O estoque de COS na camada de 0-50 cm profundidade variou entre 20,23 e 94,78 Mg ha<sup>-1</sup>, com média de 46,27 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto o estoque de NTS oscilou entre 1,48 e 8,37 Mg ha<sup>-1</sup>, com média de 3,72 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). Em média, 45% e 42% do estoque de COS e NTS, respectivamente, foi encontrado nos primeiros 20 cm de profundidade. Os valores de CV para os estoques de COS e NTS em diferentes camadas variaram de 38,79% a 44,69%, e de 43,55% a 52,86%, respectivamente. Além disso, os estoques de COS e NTS apresentam-se normalmente distribuídos, conforme indicado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 1).

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos estoques de COS e NTS até 50 cm de profundidade em Neossolos pedregosos sob floresta Caatinga.

Estoques	Profundidade do solo (cm)	N	Min.	Max.	Média	DP	CV(%)	Ass.	Curt.	K-S p-valor
			-----Mg ha <sup>-1</sup> -----							
Carbono orgânico do solo	0-10	79	3,49	21,98	8,48	3,79	44,69	0,92	0,74	0,19
	10-20	79	3,50	23,86	12,17	5,01	41,17	0,35	-0,70	0,87
	20-30	79	3,42	22,43	10,48	4,47	42,65	0,45	-0,47	0,77
	30-40	67	3,41	19,75	8,42	3,72	44,18	0,58	-0,17	0,56
	40-50	62	1,42	12,02	6,53	2,58	39,51	0,35	-1,00	0,45
	0-50	62	20,23	94,78	46,27	17,95	38,79	0,35	-0,83	0,56
Nitrogênio total do solo	0-10	79	0,16	1,67	0,62	0,30	48,39	1,07	1,16	0,39
	10-20	79	0,29	1,96	0,92	0,42	45,65	0,55	-0,59	0,44
	20-30	79	0,22	2,42	0,84	0,42	50,00	0,77	0,25	0,58
	30-40	67	0,09	1,93	0,70	0,37	52,86	1,90	1,55	0,21
	40-50	62	0,10	1,44	0,59	0,27	45,76	0,61	0,16	0,44
	0-50	62	1,48	8,37	3,72	1,62	43,55	0,62	-0,21	0,62

N = número de amostras, Min. = mínimo, Max. = máximo, DP = desvio padrão, CV = coeficiente de variação, Ass. = assimetria, Curt. = Curtose, K-S = teste de Kolmogorov-Smirnov

O estoque de COS e o estoque de NTS na camada de 0-20 cm foi relacionado com os estoques respectivos estoques na camada de 0-50 cm ( $R^2 = 0,90$ ,  $p < 0,001$ , Figura 3A;  $R^2 = 0,87$ ,  $p < 0,001$ , Figura 3B). A relação entre os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm foi bem ajustada por meio de uma equação linear ( $R^2 = 0,84$ ,  $p < 0,001$ , Figura 3C).

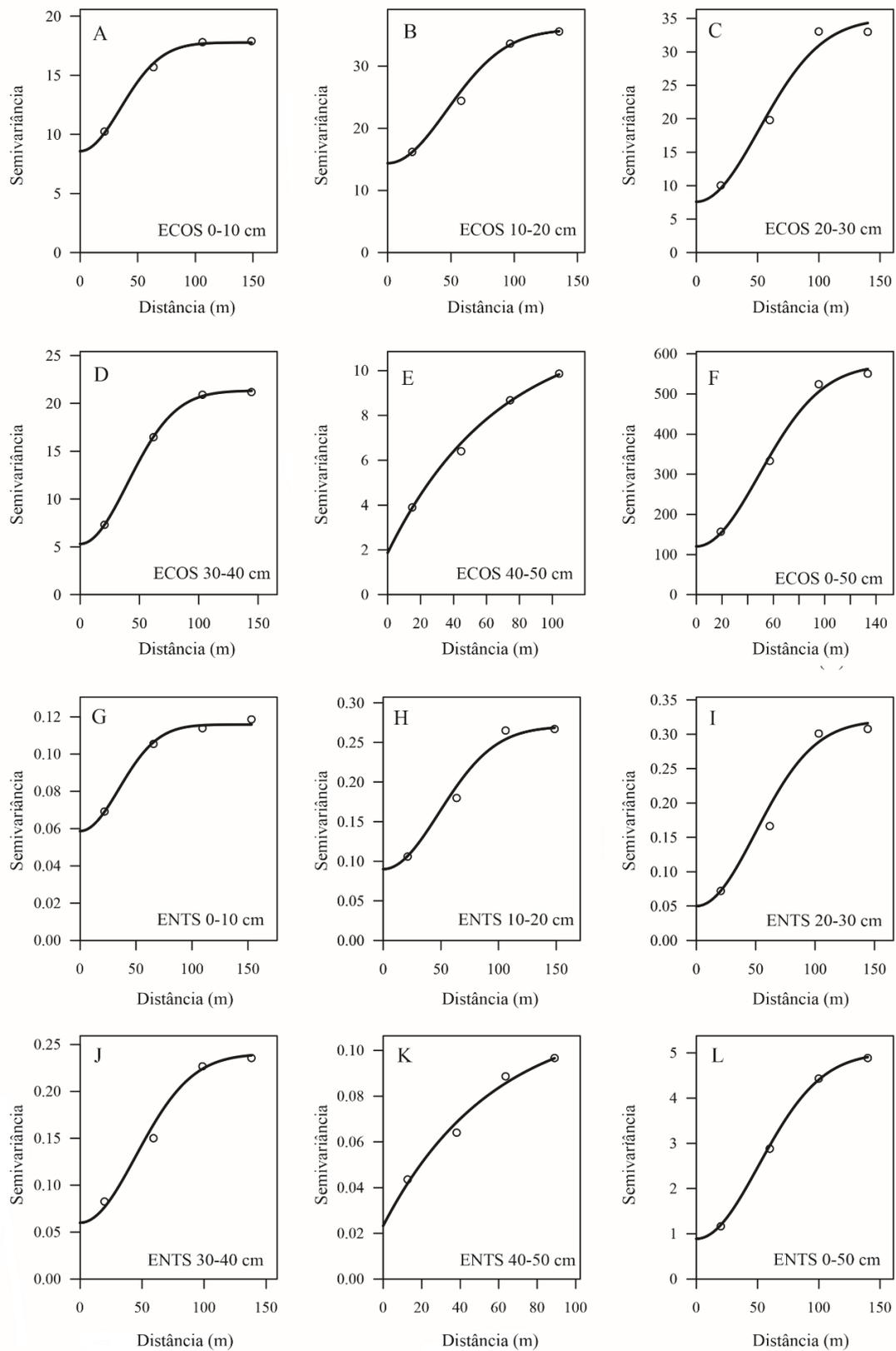


**Figura 3.** Relações entre os estoques de COS nas camadas de 0-20 e 0-50 cm (A), entre os estoques de NTS nas camadas de 0-20 e 0-50 cm (B), e entre os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm (C), em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. \*\*\* Regressão significativa  $p < 0,001$ .

### 3.3 Análise geoestatística dos estoques de COS e NTS

O modelo de semivariograma gaussiano foi o que melhor descreveu os estoques de COS e NTS em todas as camadas, exceto para a camada de 40-50 cm, ajustado ao modelo exponencial (Figura 4). Os valores de efeito pepita ( $C_0$ ) dos estoques de COS mostraram tendência de decréscimo a partir de 10-20 cm, ao passo que os estoques de NTS não tiveram tendência definida. Os valores de efeito pepita foram maiores para os estoques de COS do que para os estoques de NTS em todas as camadas, e ambos tiveram maior valor de efeito pepita e patamar ( $C_0 + C$ ) na camada de 0-50 cm (Tabela 2).

O grau de dependência espacial (GDE) dos estoques de COS variou de 15,16% a 48,13% e o de NTS ficou entre 15,62% a 50,66% (Tabela 2). Para ambos os estoques as dependências espaciais foram mais fortes nas camadas abaixo de 20 cm. Os estoques de COS e NTS apresentaram distâncias de autocorrelação espacial relativamente próximas entre cada camada ( $\geq 8,2$  m), e variação de 49,63 a 72,32 m para os estoques de COS e de 48,98 a 70,23 m para os estoques NTS nas camadas, considerando o perfil até 50 cm de profundidade.



**Figura 4.** Modelos teóricos de semivariogramas para os estoques de carbono orgânico do solo (ECOS) e estoques de nitrogênio total do solo (ENTS), para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. Os parâmetros encontram-se na Tabela 2.

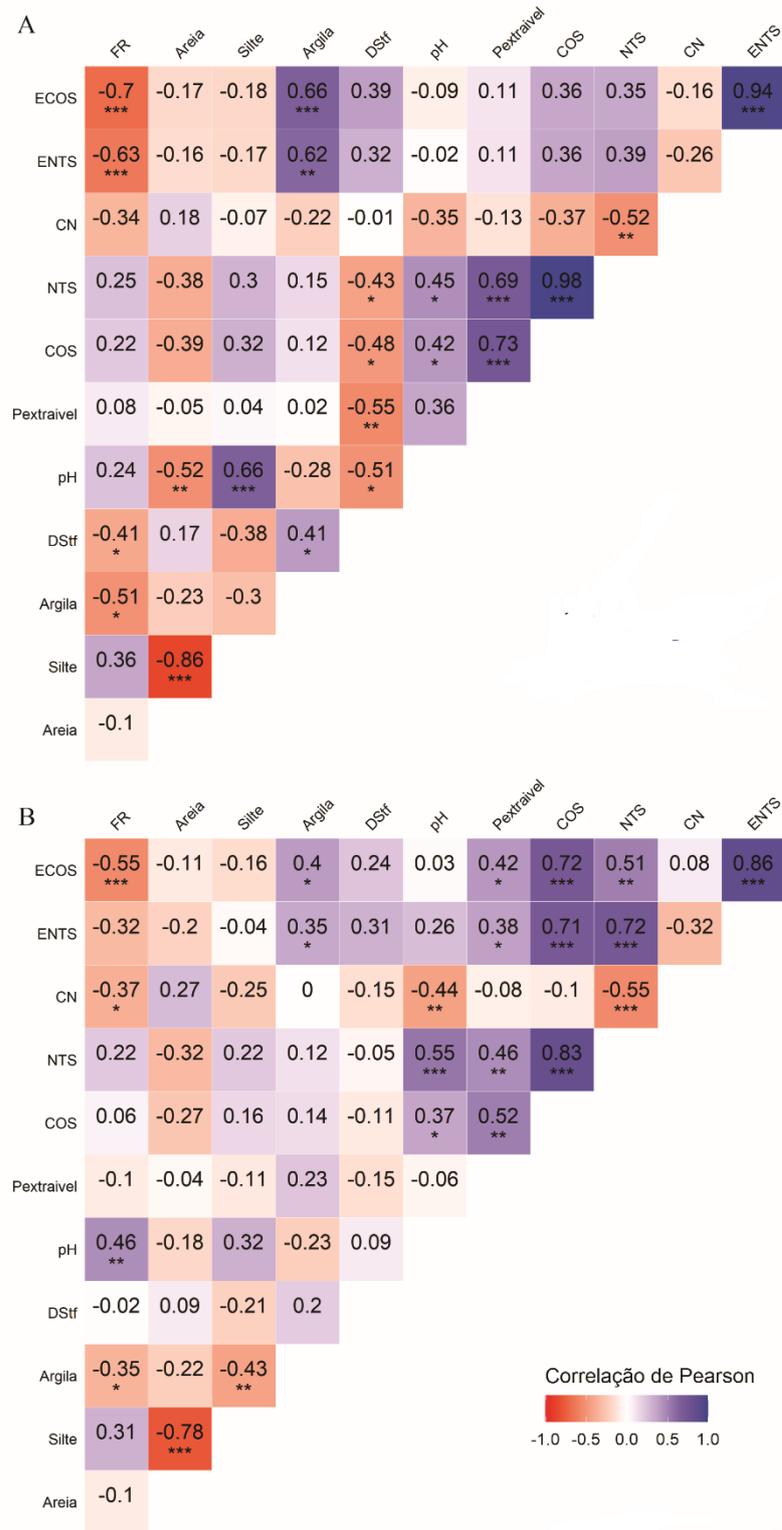
**Tabela 2.** Parâmetros dos semivariogramas e validação cruzada dos estoques de COS e NTS, para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga.

Estoque	Profundidade do solo (cm)	Modelo	$C_0$	$C_0+C$	GDE	A [m]	$\mu_{jk}$	$\sigma_{jk}$
Carbono orgânico do solo	0-10	Gaussiano	8,56	17,78	48,13	49,63	0,0002	1,0078
	10-20	Gaussiano	14,39	35,95	40,03	65,89	0,0004	0,9100
	20-30	Gaussiano	7,59	33,84	21,71	72,32	-0,0014	1,0063
	30-40	Gaussiano	5,30	21,33	24,84	56,45	0,0018	1,0799
	40-50	Exponencial	1,79	11,81	15,16	65,22	-0,0093	1,1141
	0-50	Gaussiano	120,32	572,84	21,00	69,16	0,0000	0,9511
Nitrogênio total do solo	0-10	Gaussiano	0,06	0,12	50,66	48,98	0,0004	0,9996
	10-20	Gaussiano	0,09	0,27	33,33	68,28	0,0005	0,9707
	20-30	Gaussiano	0,05	0,32	15,62	70,23	-0,0003	1,1204
	30-40	Gaussiano	0,06	0,25	24,00	63,51	0,0012	1,0479
	40-50	Exponencial	0,02	0,11	20,06	57,01	-0,0074	1,0899
	0-50	Gaussiano	0,89	5,00	17,31	71,89	0,0000	0,9811

$C_0$  – efeito pepita,  $C_0+C$  – patamar, GDE – grau de dependência espacial (%), A (m) – alcance,  $\mu_{jk}$  – erro médio e  $\sigma_{jk}$  – variância do erro médio reduzido da validação cruzada.

### 3.4 Correlação entre os estoques COS e NTS e os atributos do solo

As correlações entre os estoques (COS e NTS) e os atributos do solo (físicos e químicos) diferiram na camada de 0-20 cm ( $p \leq 0,05$ ) e na camada de 20-50 cm ( $p \leq 0,05$ ) (Figuras 5A e 5B). Em superfície, o estoque de COS e NTS foi correlacionado negativamente com o conteúdo de FR e positivamente com o conteúdo de argila. Em subsuperfície, o estoque de COS foi correlacionado negativamente com o conteúdo de FR e positivamente com o conteúdo de argila e concentrações de  $P_{\text{extraível}}$ , COS e NTS, enquanto o estoque de NTS correlacionou-se positivamente com as concentrações de  $P_{\text{extraível}}$ , COS e NTS. Em ambas as camadas do solo, não foram encontradas correlações ( $p > 0,05$ ) entre os estoques COS e NTS com o conteúdo de areia, silte,  $DS_{\text{f}}$  e pH.



**Figura 5.** Matrizes de correlação entre os atributos do solo e os estoques de COS e NTS nas camadas de 0-20 cm (A) e 20-50 cm (B) de profundidade, em Neossolos pedregosos sob floresta de Caatinga. ECOS – estoque de carbono orgânico, ENTs – estoque de nitrogênio total, FR – conteúdo de fragmentos de rochas, DS<sub>tf</sub> – densidade de terra fina, COS – carbono orgânico do solo, NTS – nitrogênio total do solo, C:N – relação carbono nitrogênio. \* p < 0,05; \*\* p < 0,01 e \*\*\* p < 0,001.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos físicos e químicos do solo

O conteúdo médio de fragmentos de rochas (FR) no perfil do solo foi de 54,3%. Esse valor é muito superior aos 25,6% encontrados em solos do semiárido da Espanha (Román-Sánchez et al., 2018), 30,5% de uma topossequência pedregosa da região semiárida da China (Du et al., 2017) e 35,4% em uma região semiárida dos Estados Unidos da América (Patton et al., 2019). Esses resultados indicam que o impacto do conteúdo de rochas na diminuição dos estoques de COS e NTS é muito maior no local estudado em comparação a outras regiões semiáridas. A elevada pedregosidade e a predominância da fração areia em todas as camadas é comum em Neossolos, devido a menor atuação do intemperismo químico. Esses solos são típicos em áreas de clima semiárido, com relevo variando de plano a suave ondulados sobre substrato granito-gnáissico (Brasil, 1972).

O aumento da  $DS_{tf}$  com a profundidade do solo são consistentes com outros estudos realizados em solos sob Caatinga (Santana et al., 2019; Andrade et al., 2020). Esse aumento é resultado da pressão exercida pelas camadas superiores sobre as camadas subjacentes (Andrade et al., 2020). Tendo em vista que os solos da área de estudo apresentam textura arenosa e altos teores de matéria orgânica, principalmente na camada superficial ( $\approx 5,7\%$ , com base na concentração de COS), pode-se inferir que os baixos valores de pH do solo resultam da decomposição de matéria orgânica do solo, por meio da liberação de íons de  $H^+$  associados a ânions orgânicos na solução do solo, assim como da exsudação e respiração do sistema radicular das espécies vegetais que produzem ácidos orgânicos e carbônico (Adeleke et al., 2017). Resultados semelhantes foram observados em uma área de Caatinga após 17 anos de exclusão de pastejo (Oliveira Filho et al., 2019).

O declínio das concentrações de  $P_{extraível}$ , COS e NTS com a profundidade do solo está de acordo com outros estudos realizados na região (Pinheiro Junior et al., 2019; Oliveira Filho et al., 2019; Santana et al., 2019, da Silva et al., 2020) e em regiões diferentes, incluindo floresta subtropical (Liu et al., 2014), floresta tropical (Stone e Plante., 2014) e floresta temperada (Diao et al., 2020). Tal fato pode ser atribuído ao maior aporte de serapilheira em superfície e a maior biomassa de raízes nos primeiros 20 cm de profundidade do solo (Costa et al., 2014; Santana et al., 2019).

### 4.2 Variabilidade vertical dos estoques de COS e NTS

Os valores de CV dos estoques de COS e NTS indicam variabilidade moderada em cada uma das camadas estudadas, inclusive na camada de 0-50 cm de profundidade. Isso está de acordo com outros estudos que avaliaram os estoques de COS e NTS em diferentes ecossistemas florestais (Were et al., 2016; Yao et al., 2019).

Os estoques médios de COS e NTS na camada de 0-50 cm foram de 46,27 Mg ha<sup>-1</sup> e 3,72 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esses valores são inferiores aos observados em outros estudos realizados em ecossistema de Caatinga. Por exemplo, os estoques médios de COS e NTS foram, respectivamente, de 98,3 e 8,6 Mg ha<sup>-1</sup> para Argissolos e de 72,1 e 5,8 Mg ha<sup>-1</sup> para Latossolos, ambos na camada de 0-100 cm (Santana et al., 2019). Para Neossolos Litólicos esses mesmos autores encontraram estoques de 54,5 Mg ha<sup>-1</sup> de COS e 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de NTS na camada de 0-50 cm. Em contrapartida, superam os 27,7 e 3,1 Mg ha<sup>-1</sup> encontrados por Santana et al. (2019) em Planossolos, e os 17,9 de COS e 1,7 Mg ha<sup>-1</sup> de NTS vistos por Schulz et al. (2016), numa associação de Planossolo e Neossolo Litólico, os dois na camada de 0-60 cm.

Comparado a Santana et al. (2019), os menores estoques de COS e NTS encontrados nesta pesquisa em relação aos Argissolos e Latossolos devem-se a menor intensidade dos processos pedogenéticos na formação desses solos, resultando em solos rasos e com baixos teores de argila. Isso implica em menor volume de solo a ser explorado pelas raízes e menor armazenamento de água (Moura et al., 2016), o que provoca menor produtividade em regiões com pluviosidade baixas e irregulares e, conseqüentemente, menor entrada de C e N no solo (Moura et al., 2016). Os menores estoques observados na área em estudo em comparação com o Neossolo Litólico analisado por Santana et al. (2019), podem ser atribuídos ao alto conteúdo de fragmentos de rochas que foi 42% maior na área estudada e ao baixo teor de argila, com valor 56% inferior, corroborando com diversos estudos (Schulz et al., 2016; Du et al., 2020).

Os maiores estoques de COS e NTS encontrados nesta pesquisa em relação àqueles observados por Santana et al. (2019) e Schulz et al. (2016) em Planossolos, devem-se provavelmente à maior suscetibilidade dos Planossolos à erosão, uma vez que apresentam baixa permeabilidade e mudanças texturais abruptas (Lima et al., 2008). O horizonte B textural dificulta a penetração das raízes, diminuindo a profundidade efetiva do solo e, conseqüentemente, o acúmulo de COS e NTS (Bamberg et al., 2009). Em adição, também possuem baixa fertilidade e drenagem limitada, dificultando a agregação e a estabilização da matéria orgânica (Oliveira et al., 2009).

Em relação a outros ecossistemas semiáridos, verifica-se que os estoques de COS e NTS encontrados nesta pesquisa são inferiores aos 76,2 e 6,7 Mg ha<sup>-1</sup> encontrados em um Neossolo sob floresta seca do México (Jaramillo et al., 2003), na camada de 0-60 cm. Essa diferença é explicada, principalmente pela menor pluviosidade no local estudado ( $\approx 200$  mm). Também é menor que os 81,0 e 9,2 Mg ha<sup>-1</sup> observados em Cambissolo sob savanna no semiárido da Etiópia (Yusuf et al., 2015), na camada de 0-60 cm. Os menores estoques de COS e NTS no presente estudo, em comparação aos observados no semiárido da Etiópia, devem-se provavelmente à combinação da menor pluviosidade ( $\approx 70$  mm) e maior temperatura ( $\approx 9$  °C), o que leva a uma menor produção de biomassa e maior taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, respectivamente (Jobbagy et al., 2000).

Por outro lado, os estoques de COS e NTS do presente estudo são muito superiores aos 17,0 e 1,8 Mg ha<sup>-1</sup>, encontrados em Neossolo Quartzarênico sob vegetação de savanna no semiárido sul-africano, na camada de 0-60 cm de profundidade (Mureva et al., 2018). Essa diferença é explicada pela pluviosidade que foi cerca de 128 mm maior na área de estudo. No entanto, é importante considerar também as diferenças no tipo de vegetação, pois os tipos funcionais de plantas inerentes de cada região/ecossistema ajudam a controlar as distribuições de COS e NTS no perfil do solo, por meio de diferenças no padrão de alocação acima e abaixo do solo (Jobbagy et al., 2000).

Em solos pedregosos, a quantificação dos estoques de COS e NTS é complexa devido à dificuldade de determinação da densidade da terra fina e conteúdo de fragmentos de rochas (Román-Sánchez et al., 2018; Patton et al., 2019). A determinação dessas variáveis para calcular os estoques de COS e NTS em uma grande área e em profundidade é trabalhosa, demorada e onerosa (Patton et al., 2019). Por essa razão, dados de estoques de COS e NTS da superfície do solo têm sido utilizados para estimar os estoques de COS e NTS de maiores profundidades a partir de equações de regressão (Zhang et al., 2013; Li et al., 2019).

Nesse sentido, verifica-se que equações de regressão linear são capazes de estimar com precisão estoques de COS e NTS localizados na camada de 0-50 cm de profundidade, por meio de dados obtidos na camada de 0-20 cm, visto que estas equações apresentam coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 0,85. Essa ferramenta é promissora, pois mais da metade dos estoques de COS e NTS encontram-se abaixo de 20 cm de profundidade, onde há grande dificuldade para mensuração da densidade de terra fina em solos pedregosos, resultando em maior possibilidade de erros de medição. Além disso, a relação entre os estoques de COS e NTS na camada de 0-50 cm mostra que o estoque de NTS em um perfil de mesma espessura pode ser estimado com dados de estoque de COS.

### 4.3 Análise geoestatística dos estoques de COS e NTS

Os estoques de COS e NTS mostraram valores de efeito pepita ( $C_0$ ) positivos que podem ser explicados por variabilidade de curto alcance, variabilidade aleatória e inerente (Haruna, 2021). Os maiores valores de efeito pepita para os estoques de COS em todas as profundidades devem-se aos seus maiores valores frente aos estoques de NTS, ao passo que o decréscimo em profundidade é reflexo da menor perturbação por fatores ambientais. Resultados semelhantes foram encontrados por Yao et al. (2019), estudando a variabilidade espacial dos estoques de COS e NTS em uma floresta subtropical da China.

A relação pepita/patamar representa o grau de dependência espacial (GDE). As relações  $< 25\%$ ,  $25-75\%$  e  $> 75\%$  correspondem, respectivamente, à dependência espacial forte, moderada e fraca (Cambardella et al., 1994). Nesse sentido, os estoques de COS e NTS tiveram GDE moderado nas camadas de 0-10 e 10-20 cm e forte em 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm. Isso mostra que fatores intrínsecos (exs: material de origem, mineralogia, propriedades físico-químicas, topografia e vegetação) e extrínsecos (exs: ação antrópica e tempo de recuperação) controlam os estoques de COS e NTS até 20 cm (Cambardella e Karlen, 1999). Por outro lado, fatores estritamente intrínsecos respondem pela forte dependência na camada de 20-50 cm.

Na camada de 0-10 cm, há maior variação espacial dos estoques de COS e NTS, em comparação com as camadas subjacentes, visto que apresenta menor valor de alcance. A maior variabilidade na camada superficial ocorre devido à maior redistribuição espacial de material mineral e matéria orgânica do solo ao longo das encostas (Wiaux et al., 2014; Novák et al., 2018). Esses resultados são condizentes com os encontrados em uma floresta de Miombo da África (Woollen et al., 2012). Além disso, o fato dos estoques de COS e NTS apresentarem distâncias de autocorrelação espacial próximas nas diferentes profundidades do solo, comprova a forte interação que os ciclos de C e N possuem na produtividade e sequestro de carbono em ecossistemas florestais (Melillo et al., 2011).

Os resultados mostram ainda que a amostragem de solos, para quantificar os estoques de COS e NTS em Neossolos pedregosos sob Caatinga, devem considerar as mudanças nos intervalos de autocorrelação que ocorrem em diferentes profundidades do solo. Nesse sentido, os resultados sugerem que uma distância entre pontos de amostragem maior do que 72 m garantiria a independência das amostras, para quantificar os estoques de COS e NTS nas diferentes camadas, inclusive em todo perfil de 0-50 cm profundidade. A quantificação dos

estoques de COS e NTS em todo perfil do solo é essencial para não subestimar os reservatórios terrestres de C e N (Jiang et al., 2021).

#### *4.4 Correlação entre os estoques COS e NTS e os atributos do solo*

As correlações negativas dos estoques de COS e NTS com o conteúdo de FR e positivas com o conteúdo de argila na superfície do solo (0-20 cm), sugerem que o incremento do conteúdo de FR diminui os estoques de COS e NTS, enquanto o inverso ocorre com o aumento do conteúdo de argila. A influência negativa do conteúdo de FR sobre os estoques de COS e NTS incluem a redução da massa de terra fina, uma vez que o conteúdo de C e N se encontra nessa fração do solo, e pela redução da densidade de terra fina ( $DS_{tf}$ ) ocasionada pelos espaços porosos formados entre o FR e a terra fina (Du et al., 2017; Lai et al., 2021). Essa afirmação tem como base a correlação negativa do conteúdo de FR com o conteúdo de argila e  $DS_{tf}$  (Figura 5A). É importante destacar que a influência positiva do conteúdo de argila nos estoques de COS e NTS ocorre por meio da oclusão do C e N dentro de agregados (proteção física) e a estabilização via ligação com a superfície dos minerais de argila (Woollen et al., 2012; Schultz et al., 2016).

Em subsuperfície (20-50 cm), o conteúdo de FR correlacionou-se negativamente somente com o estoque de COS. Enquanto o conteúdo de argila permaneceu correlacionado com ambos os estoques, mas com uma força menor, quando comparado com a superfície. O  $P_{extraível}$  e notadamente os teores de COS e NTS correlacionaram-se positivamente com os estoques de COS e NTS, superando inclusive a força de correlação do conteúdo de argila. Esses resultados denotam que o aumento dos teores de  $P_{extraível}$  elevam os teores de COS e NTS, aumentando, consequentemente, os estoques de COS e NTS. A provável explicação é que as concentrações mais baixas de  $P_{extraível}$ , COS e NTS em maiores profundidades aumentam a importância relativa da proteção química em subsuperfície (Fraga e Salcedo, 2004; Li et al., 2020).

O P é um macronutriente que influencia o crescimento radicular, sendo observado que em regiões com baixos teores de P, às plantas normalmente apresentam sistema radicular superficial, e pouco desenvolvimento, resultando numa baixa exploração do solo e menor eficiência do uso de água e nutrientes (Silva e Delatorre, 2009). Portanto, a disponibilidade de P é essencial para a produção de biomassa e acúmulo de COS e NTS no solo, principalmente na região semiárida, onde existe uma escassez de recursos hídricos e a predominância de solos com baixa fertilidade natural.

## 5. CONCLUSÕES

Os estoques médios de COS em uma encosta com Neossolos pedregosos foram de 8,48, 12,17, 10,48, 8,42, 6,53 e 46,27 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade. E os estoques de NTS foram de 0,62, 0,92, 0,84, 0,70, 0,59 e 3,72 Mg ha<sup>-1</sup>, para as camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade, na devida ordem. A variabilidade em cada camada do solo foi classificada como moderada, com base nos coeficientes de variação.

Os intervalos de autocorrelação espacial dos estoques de COS e NTS variam com a profundidade do solo, de 49,63 a 72,32 m e de 48,98 a 70,23 m, respectivamente. Os estoques de COS e NTS têm dependência espacial moderada nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, e forte nas camadas de 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm.

Os estoques de COS e NTS na superfície do solo (0-20 cm) são influenciados negativamente pelo conteúdo de fragmentos de rochas e positivamente pelo conteúdo de argila. Em subsuperfície (20-50 cm), o estoque de COS é influenciado negativamente pelo conteúdo de fragmentos de rochas e positivamente pelas concentrações de P<sub>extraível</sub>, COS e NTS, e o estoque de NTS apenas pelas concentrações de P<sub>extraível</sub>, COS e NTS.

Para regiões com as mesmas características da área em estudo, recomenda-se uma distância superior a 72 m entre pontos, para se obter uma amostragem independente, e quantificar os estoques de COS e NTS, para a camada de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 0-50 cm de profundidade.

## 6. REFERÊNCIAS

- Adeleke, R., Nwangburuka, C., Oboirien, B., 2017. Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. *South African Journal of Botany* 108, 393-406. doi:10.1016/j.sajb.2016.09.002.
- 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, 711-728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Andrade, E.M., Valbrun, W., Almeida, A.M.M., Rosa, G., Silva, A.G.R., 2020. Land-Use Effect on Soil Carbon and Nitrogen Stock in a Seasonally Dry Tropical Forest. *Agronomy* 10, 158. doi:10.3390/agronomy10020158.
- Arruda, D.M., Schaefer, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Rodrigues, P.M.S., Duque-Brasil, R., Ferreira-JR, W.G., Oliveira-Filho, A.T., 2015. Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. *Folia Geobotanica* 50, 175-184. doi:10.1007/s12224-015-9221-0.
- Bamberg, A.L., Pauletto, E.A., Gomes, A. S. da; Timm, L.C., Spinelli Pinto, L.F.; Lima, A.C.R., da Silva, T.R., 2009. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 1079-1086.
- Barré, P., Durand, H., Chenu, C., Meunier, P., Montagne, D., Castel, G., Billiou, D., Soucémariadin, L., Cécillon, L., 2017. Geological control of soil organic carbon and nitrogen stocks at the landscape scale. *Geoderma* 285, 50-56.
- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151-63.
- BRASIL. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado da Paraíba. Rio de Janeiro, 1972.
- Burrows, S. N., Gower, S.T., Clayton, M.K., Mackay, D.S., Ahl, D.E., Norman, J.M., Diak, G., 2002. Application of geostatistics to characterize leaf area index (LAI) from flux tower to landscape scales using a cyclic sampling design. *Ecosystems* 5, 667-679.

Cambardella, C.A., Karlen, D.L., 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture* 1, 5-14.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal* 58, 1501-1511.

Cao, Q., Li, J., Wang, G., Wang, D., Xin, Z., Xiao, H., Zhang, K., 2021. On the spatial variability and influencing factors of soil organic carbon and total nitrogen stocks in a desert oasis ecotone of northwestern China. *Catena* 206, 105533. doi:10.1016/j.catena.2021.105533.

Clinger, W., Van Ness, J. W., 1976. On unequally spaced time points in time series. *The Annals of Statistics* 4, 736-45.

Costa, C.R.G. Dinâmica temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> e produção de glomalina em área de Caatinga sob Neossolo Litólico. 2019. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2019.

Costa, T.L., Sampaio, E.V.S.B., Sales, M.F. Accioly, L.J.O., Althoff, T.D., Pareyn, F.G.C., Albuquerque, E.R.G.M., Menezes, R.S.C., 2014. Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid Northeast Brazil. *Plant and Soil* 378, 113-123. doi:10.1007/s11104-013-2009-1.

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., 2020. 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. doi:10.1016/j.still.2020.104852.

Diao, M., Yang, K., Zhu, J., Li, M., Xu, S., 2020. Native broad-leaved tree species play key roles on maintaining soil chemical and microbial properties in a temperate secondary forest, Northeast China. *Forest Ecology and Management* 462, 117971. doi:10.1016/j.foreco.2020.117971.

Du, Z., Cai, Y., Yan, Y., Wang, X., 2017. Embedded rock fragments affect alpine steppe plant growth, soil carbon and nitrogen in the northern Tibetan Plateau. *Plant and Soil* 420, 79-92. doi: 10.1007/s11104-017-3376-9.

EMBRAPA, 2011. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 2nd ed. (230 pp.).

- EMBRAPA, 2013. Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, 2013. Rio de Janeiro, 3<sup>rd</sup> ed. (353 pp.).
- Fang, X., Xue, Z., Li, B. An, S., 2012. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena* 88, 6-13.
- Fraga, V.S., Salcedo, I.H., 2004. Declines of Organic Nutrient Pools in Tropical Semi-Arid Soils under Subsistence Farming. *Soil Science Society of America Journal* 68, 215-224.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, pp. 383-411.
- Gonzalez, O.J., Zak, D.R., 1994. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. *Plant and Soil* 163, 45-54, 1994.
- Haruna, S. I., 2021. Spatial and fractal characterization of selected soil nutrients along a catena. *Catena* 204, 105443. doi:10.1016/j.catena.2021.105443.
- Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S.E., Hugelius, G., Kramer, M.G., Pineiro, G., 2017. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48, 419-445.
- Jacomine, P.K.T., 1996. Solos sob caatingas: características e uso agrícola. In: Alvarez V., V.H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M.P.F. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável*. Viçosa, SBCS-UFV. 930p.
- Jaramillo, V.J., Kauffman, J.B., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D.L., Ellingson, L.J., 2003. Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems* 6, 609-629. doi:10.1007/s10021-002-0195-4.
- Jiang, Z.-D., Wang, Q.-B., Brye, K.R., Adhikari, K., Sun, F.-J., Sun, Z.-X., Chen, S., Owens, P.R., 2021. Quantifying organic carbon stocks using a stereological profile imaging method to account for rock fragments in stony soils. *Geoderma* 385, 14837. doi:10.1016/j.geoderma.2020.11483.
- Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10, 423-436.

- Kunkel, M.L., Flores, A. N., Smith, T.J., McNamara, J. P., Benner, S. G., 2011. A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain. *Geoderma* 165, 1-11. doi:10.1016/j.geoderma.2011.06.011.
- Lai, X., Zhou, Z., Liao, K., Zhu, Q., 2021. Responses of soil carbon and nitrogen cycles to the physical influences of rock fragment in soils. *Catena* 203, 105369.
- Li, J., Nie, M., Pendall, E., 2020. Soil physico-chemical properties are more important than microbial diversity and enzyme activity in controlling carbon and nitrogen stocks near Sydney, Australia. *Geoderma* 366, 114201. doi:10.1016/j.geoderma.2020.114201.
- Li, M., Han, X., Du, S., Li, L.-J., 2019. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China. *Catena* 174, 285-292. doi:10.1016/j.catena.2018.11.027
- Liao, K., Lai, X., Zhou, Z., Zeng, X., Xie, W., Castellano, M. J., Zhu, Q., 2019. Whether the rock fragment content should be considered when investigating nitrogen cycle in Stony soils? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124. doi:10.1029/2018JG004780.
- Lima, C.L.R., Pillon, C.N., Suzuki, L.E.A.S., Cruz, L.E.C., 2008. Atributos físicos de um Planossolo Háptico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32,1849-1855. doi:10.1590/S0100-06832008000500006.
- Liu, X., Meng, W., Liang, G., Li, K., Xu, W., Huang, L., Yan, J., 2014. Available Phosphorus in Forest Soil Increases with Soil Nitrogen but Not Total Phosphorus: Evidence from Subtropical Forests and a Pot Experiment. *PLoS ONE* 9, e88070. doi:10.1371/journal.pone.0088070.
- Lozano-García, B., Parras-Alcántara, L., Brevik, E.C., 2016. Impact of topographic aspect and vegetation (native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas. *Science of the Total Environment* 544, 963-970. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.022.
- Lützow, M.V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal Soil Science* 57, 426–445.
- Luysaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.

- Macedo, R.S., Beirigo, R.M., Medeiros, B.M., Felix, V.J.L., Souza, R.F.S., Bakker, A.P., 2021. Processos pedogenéticos e susceptibilidade dos solos à degradação no semiárido brasileiro. *Caminhos da Geografia* 22, 176-195. doi: 10.14393/RCG228155397.
- McBratney, A.B., Webster, R., 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.* 37, 617–639.
- Melillo, J.M., Butler, S., Johnson, J., Mohan, J., Steudler, P., Lux, H., Burrows, E., Bowles, F., Smith, R., Scott, L., et al., 2011. Soil warming, carbon-nitrogen interactions, and forest carbon budgets. *P. Natl. A. Sci.* 108 , 9508-9512.
- Moura, P.M., Althoff, T.D., Oliveira, R.A., Souto, J.S., Souto, P.C., Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., 2016. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 105, 25-38.
- Mureva, A., Ward, D., Pillay, T., Chivenge, P., Cramer, M., 2018. Soil Organic Carbon Increases in Semi-Arid Regions while it Decreases in Humid Regions Due to Woody-Plant Encroachment of Grasslands in South Africa. *Scientific Reports* 8, 1-12.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36. doi:10.1016/s0003-2670(00)88444-5.
- Nie, X., Guo, W., Huang, B., Zhuo, M., Li, D., Li, Z., Yuan, Z., 2019. Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region. *Catena* 176, 104-111. doi:10.1016/j.catena.2019.01.007.
- Novák, T.J., Molnár, M., Buró, B., 2018. Reconstruction of Soil Carbon Redistribution Processes along a Hillslope Section in a Forested Area. *Radiocarbon* 60, 1413-1424. doi:10.1017/rdc.2018.94.
- Oliveira Filho, J.S., Vieira, J.N., Silva, E.M.R. da., Oliveira, J.G.B., Pereira, M.G., Brasileiro, F.G., 2019. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. *Journal of Arid Environments* 166, 1-10. doi:10.1016/j.jaridenv.2019.03.006.
- Oliveira, L.B., Fontes, M.P.F., Ribeiro, M.R., Ker, J.C., 2009. Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas do semiárido do Nordeste

brasileiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 1333–1345. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500026>.

Olivoto, T., Lúcio, A.D., 2020. metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods Ecology and Evolution* 11, 783-789. [doi.org/10.1111/2041-210X.13384](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384).

Page-Dumroese, D.S., Brown, R.E., Jurgensen, M.F., Mroz, G.D., 1999. Comparison of Methods for Determining Bulk Densities of Rocky Forest Soils. *Soil Science Society of America Journal* 63, 379-383. [doi:10.2136/sssaj1999.0361599500](https://doi.org/10.2136/sssaj1999.0361599500).

Patton, N.R., Lohse, K.A., Seyfried, M.S., Will, R., S. Benner., 2019. Lithology and coarse fraction adjusted bulk density estimates for determining total organic carbon stocks in dryland soils. *Geoderma* 337, 844-852. [doi:10.1016/j.geoderma.2018.10.036](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.036).

Pinheiro Junior, C.R., Pereira, M.G., Oliveira Filho, J.S., Beutler, S.J., 2019. Can topography affect the restoration of soil properties after deforestation in a semiarid ecosystem? *Journal of Arid Environments* 162, 45-52. [doi:10.1016/j.jaridenv.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.004).

Prietzl, J., Wiesmeier, M., 2019. A concept to optimize the accuracy of soil surface area and SOC stock quantification in mountainous landscapes. *Geoderma* 356, 113922. [doi:10.1016/j.geoderma.2019.113922](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113922).

R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.

Ribeiro P.J., Jr, Diggle, P.J., 2016. GeoR: analysis of geostatistical data. R Package Version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>.

Román-Sánchez, A., Vanwalleghem, T., Peña, A., Laguna, A., Giráldez, J.V., 2018. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes, *Geoderma* 311, 159-166. [doi:10.1016/j.geoderma.2016.10.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.013).

Santana, M.S., de Sá Barretto Sampaio, E.V., Giongo, V., Menezes, R.S.C., de Jesus, K.N., de Albuquerque, E.R.G.M., do Nascimento, D.M., Pareyn, F.G.C., Cunha, T.J.F., Sampaio, R.M.B., et al., 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. *Geoderma Regional*, e00205. [doi:10.1016/j.geodrs.2019.e00205](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205).

Schulz, K., Voigt, K., Beusch, C., Almeida-Cortez, J.S., Kowarik, I., Walz, A., Cierjacks, A., 2016. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *Forest Ecology and Management* 367, 62-70. [doi:10.1016/j.foreco.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011).

Silva, A.A.; Delatorre, C.A. Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 8, n. 2, p. 152-163, 2009.

Souza, R., Souza, E., Netto, A.M., Almeida, A.Q. de Júnior, G.B., Silva, J.R.I., Lima, J.R., Antonino, A.C.D., 2017. Assessment of the physical quality of a Fluvisol in the Brazilian semiarid region. *Geoderma Regional* 10, 175-182. doi:10.1016/j.geodrs.2017.07.008.

Stone, M.M., Plante, A.F., 2014. Changes in phosphatase kinetics with soil depth across a variable tropical landscape. *Soil Biology Biochemistry* 71, 61-67.

VandenBygaart, A.J., Gregorich, E.G., Angers, D.A., McConkey, B.G., 2007. Assessment of the lateral and vertical variability of soil organic carbon. *Canadian Journal of Soil Science* 87, 433-444.

Vieira, S.R., de Carvalho, J.R.P., González, A.P., 2010. Jack knifing for semivariograma validation. *Bragantia* 69, 97-105. doi:10.1590/s0006-87052010000500011.

Wang, M., Liu, H., Lennartz, B., 2021. Small-scale spatial variability of hydro-physical properties of natural and degraded peat soils. *Geoderma* 399, 115123. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115123.

Wang, S., Zhuang, Q., Wang, Q., Jin, X., Han, C., 2017. Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China. *Geoderma* 305, 250-263. doi:10.1016/j.geoderma.2017.05.048.

Webster R., Oliver MA., 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester: Wiley. pp 65-134.

Were, K., Singh, B.R., Dick, Ø.B., 2016. Spatially distributed modelling and mapping of soil organic carbon and total nitrogen stocks in the Eastern Mau Forest Reserve, Kenya. *Journal Geographical Sciences* 26, 102-124.

Wiaux, F., Cornelis, J.T., Cao, W., Vanclooster, M., Van Oost, K., 2014. Combined effect of geomorphic and pedogenic processes on the distribution of soil organic carbon quality along an eroding hillslope on loess soil. *Geoderma* 216, 36-47.

Woollen, E., Ryan, C.M., Williams, M., 2012. Carbon Stocks in an African Woodland Landscape: Spatial Distributions and Scales of Variation. *Ecosystems* 15, 804-818. doi: 10.1007/s10021-012-9547-x.

- Yao, X., Yu, K., Deng, Y., Zeng, Q., Lai, Z., Liu, J., 2019. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in Masson pine (*Pinus massoniana*) forests in subtropical China. *Catena*, 178, 189–198. doi:10.1016/j.catena.2019.03.004
- Yusuf, H.M., Treydte, A.C., Sauerborn, J., 2015. Managing Semi-Arid Rangelands for Carbon Storage: Grazing and Woody Encroachment Effects on Soil Carbon and Nitrogen. *PLoS ONE* 10, e0109063. doi:10.1371/journal.pone.0109063.
- Zhang, C., Liu, G., Xue, S., Sun, C., 2013. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 54, 16–24. doi:10.1016/j.ejsobi.2012.10.007.
- Zhang, X., Liu, M., Zhao, X., Li, Y., Zhao, W., Li, A., Chen, S., Chen, S., Han, X., Huang, J., 2018. Topography and grazing effects on storage of soil organic carbon and nitrogen in the northern China grasslands. *Ecological Indicators* 93, 45-53.
- Zhou, Y., Chen, S., Zhu, A.-X., Hu, B., Shi, Z., Li, Y., 2021. Revealing the scale- and location-specific controlling factors of soil organic carbon in Tibet. *Geoderma* 382, 114713. doi:10.1016/j.geoderma.2020.114713.

## **CAPÍTULO II**

### **VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> DE UM NEOSSOLO LITÓLICO SOB FLORESTA DE CAATINGA**

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Variabilidade temporal e espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> de um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga**. 2021. 30p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

## RESUMO

Quantificar a variabilidade do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em solos de referência, como os Neossolos Litólicos do semiárido brasileiro (214.311,07 km<sup>2</sup>), é essencial para obter medições precisas do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo e melhorar sua estimativa global. Assim, objetivou-se avaliar a variabilidade temporal e espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em uma floresta de Caatinga e relacioná-la às variáveis ambientais e aos atributos físicos e químicos do solo. A pesquisa foi realizada na estação experimental Professor Ignácio Salcedo, do Instituto Nacional do Semiárido em Campina Grande, Paraíba, Brasil, em uma área de vegetação de Caatinga conservada. O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi medido em 42 pontos distribuídos aleatoriamente em uma área de aproximadamente 0,72 ha. O efluxo médio de CO<sub>2</sub> no solo variou de 0,47 a 4,14 μmol de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> na estação seca e úmida, respectivamente. A variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo é explicada 93% e 52% pelo conteúdo volumétrico de água do solo e temperatura do solo, respectivamente. As relações não lineares entre o conteúdo volumétrico de água do solo e a temperatura do solo explicam 87% da variabilidade. A distância de autocorrelação espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo oscilou de 5,7 a 64,3 m e foi menor durante a estação úmida. A variabilidade espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo está relacionada ao COS, C:N, pH, argila, conteúdo volumétrico de água do solo e temperatura do solo, mas o tipo de relação difere com a estação. A pesquisa revelou que a variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo é controlada principalmente pelo conteúdo volumétrico de água do solo. Para quantificar o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo, deve-se adotar uma distância entre pontos maior que 64,3 m, para que as medidas sejam consideradas estatisticamente independentes.

**Palavras-chave:** solos de referência; respiração do solo; árvore de regressão; autocorrelação espacial.

SOUZA, Renato Francisco da Silva. **Temporal and spatial variability of CO<sub>2</sub> efflux from a Leptosol under Caatinga forest.** 2021. 30p. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba.

### ABSTRACT

Quantifying the variability of soil CO<sub>2</sub> efflux in reference soils, such as the Leptosol of the Brazilian semiarid region (214,311.07 km<sup>2</sup>), is essential to obtain accurate measurements of soil CO<sub>2</sub> efflux and improve its global estimate. Thus, the objective was to evaluate the temporal and spatial variability of the soil CO<sub>2</sub> efflux in a Caatinga forest and relate it to environmental variables and physical and chemical soil attributes. The research was carried out at the Professor Ignácio Salcedo experimental station, at Instituto Nacional do Semiárido in Campina Grande, Paraíba, Brazil, in an area of conserved Caatinga vegetation. The soil CO<sub>2</sub> efflux was measured in 42 points randomly distributed in about 0.72 ha area. The average soil CO<sub>2</sub> efflux varied from 0.47 to 4.14 μmol of CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in a dry and wet season, respectively. The temporal variability of soil CO<sub>2</sub> efflux is explained 93% and 52% by the volumetric soil water content and soil temperature, respectively. The non-linear relationship between volumetric soil water content and soil temperature explains 87% of the variability. The autocorrelation spatial distance of soil CO<sub>2</sub> efflux oscillated from 5.7 to 64.3 m and was smaller during the wet season. The spatial variability of soil CO<sub>2</sub> efflux related to SOC, C:N, pH, clay, volumetric soil water content and soil temperature, but the type of relationship differs with season. The research revealed that the temporal variability of soil CO<sub>2</sub> efflux is mainly controlled by the volumetric soil water content. To quantify the efflux of CO<sub>2</sub> from the soil, a distance between points greater than 64.3 m must be adopted, for the measurements to be considered statistically independent.

**Keywords:** Reference soil, Soil respiration, Regression Tree, Autocorrelation spatial

## 1. INTRODUÇÃO

O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>), mais conhecido como respiração do solo, é um importante componente do ciclo global do carbono (Shi et al., 2016). Globalmente, cerca de 100 Pg C é liberado na atmosfera todos os anos na forma de respiração do solo, que é muito maior do que a quantidade de carbono liberado pela combustão de combustível fóssil (IPCC, 2013). Logo, quantificar o ECO<sub>2</sub> de diferentes biomas ao redor do mundo é essencial para a obtenção de uma estimativa confiável do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em escala global (Xu e Sang, 2016; Jiang et al., 2020).

O ECO<sub>2</sub> é a soma da respiração autotrófica, derivada das raízes vivas e rizosfera, e da respiração heterotrófica, proveniente da decomposição da matéria orgânica e liteira (Luo e Zhou, 2006). Ambas as respirações são controladas por fatores bióticos como fotossíntese, biomassa de raízes finas, tipo de vegetação e comunidade microbiana (Tang e Baldocchi, 2005; Knohl et al., 2008), e abióticos como propriedades do solo, quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, topografia e clima (Takahashi et al., 2011; Shahbaz et al., 2017; Tian et al., 2019). Por esse motivo, o ECO<sub>2</sub> varia amplamente no tempo e no espaço e tem sua quantificação dificultada (Ebrahimi et al., 2019).

A variabilidade temporal do ECO<sub>2</sub> pode ser quantificada com certa facilidade nos ecossistemas (Leon et al., 2014; Jiang et al., 2020), e analisada com a estatística clássica. Embora seja utilizada para avaliar a variabilidade espacial, a estatística clássica não disponibiliza informações sobre a autocorrelação e a dependência espacial entre pontos na área de interesse. Por essa razão, técnicas de geoestatística têm sido utilizadas com sucesso. Por exemplo, Kosugi et al. (2007) encontraram autocorrelação espacial do ECO<sub>2</sub> variando de 4,4 e 24,7 m, em floresta tropical úmida, enquanto Shi et al. (2016), verificaram autocorrelação espacial entre 14,7 e 22,5 m em floresta de pinus. O ECO<sub>2</sub> em floresta de pinheiros teve autocorrelação espacial entre 66 a 92 m (ArchMiller et al., 2016).

Em ecossistema de Caatinga, alguns estudos foram realizados avaliando a variabilidade temporal do ECO<sub>2</sub>, bem como o papel da temperatura e umidade do solo nessa variabilidade (Martins, 2012; Lima et al., 2020; Santos et al., 2020). Enquanto a variabilidade temporal é relativamente bem compreendida, informações sobre a variabilidade espacial do ECO<sub>2</sub>, especificamente sobre a autocorrelação e dependência espacial são escassas ou inexistentes em solos sob Caatinga. Essas informações são essenciais não apenas para compreender a dinâmica do ECO<sub>2</sub>, mas também determinar a distância de amostragem adequada para quantificar ECO<sub>2</sub> e a resposta às mudanças ambientais (Stoyan et al., 2000).

Esta pesquisa foi realizada em Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. Estes solos são representativos do semiárido brasileiro por abrangerem 214.311,07 km<sup>2</sup> ( $\approx$  19%), apresentam significativa importância ecológica e, embora não possua aptidão agropecuária, sua utilização para cultivo e pecuária faz parte do uso histórico e atual (Santana et al., 2019). Solos com essas características são denominados solos de referência (USDA, 2010), e fornecem informações seguras das condições naturais dos solos e, conseqüentemente, a compreensão e interpretação de solos com propriedades semelhantes e de solos sob diferentes coberturas.

Em face ao exposto, objetivou-se com esta pesquisa: a) avaliar a variabilidade temporal do ECO<sub>2</sub> de um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga, e sua relação com o conteúdo volumétrico de água do solo e temperatura do solo; b) determinar a autocorrelação e dependência espacial do ECO<sub>2</sub> em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga; e c) determinar as relações espaciais do ECO<sub>2</sub> com o conteúdo volumétrico de água do solo, temperatura do solo e os atributos físicos e químicos do solo, na estação seca e na estação úmida. A hipótese testada é de que há variabilidade temporal e espacial do ECO<sub>2</sub>, porque a atividade autotrófica e heterotrófica que compõem o ECO<sub>2</sub> são afetadas por fatores ambientais como temperatura do solo e conteúdo volumétrico de água do solo e pelos atributos físicos e químicos do solo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado na estação experimental Professor Ignácio Salcedo, pertencente ao Instituto Nacional do Semiárido (7°16'47.46" S, 35°58'29.50"), no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil, em um fragmento de floresta de Caatinga sob regeneração há aproximadamente 40 anos. O clima da região é semiárido (Alvares et al., 2013) com temperatura média anual de 28,7 °C. Com base nos dados da estação meteorológica, localizada a aproximadamente 1 km da área, durante o período de 2008 a 2018 a precipitação média anual foi de 478 mm, concentrada entre os meses de abril e julho, com grandes flutuações anuais.

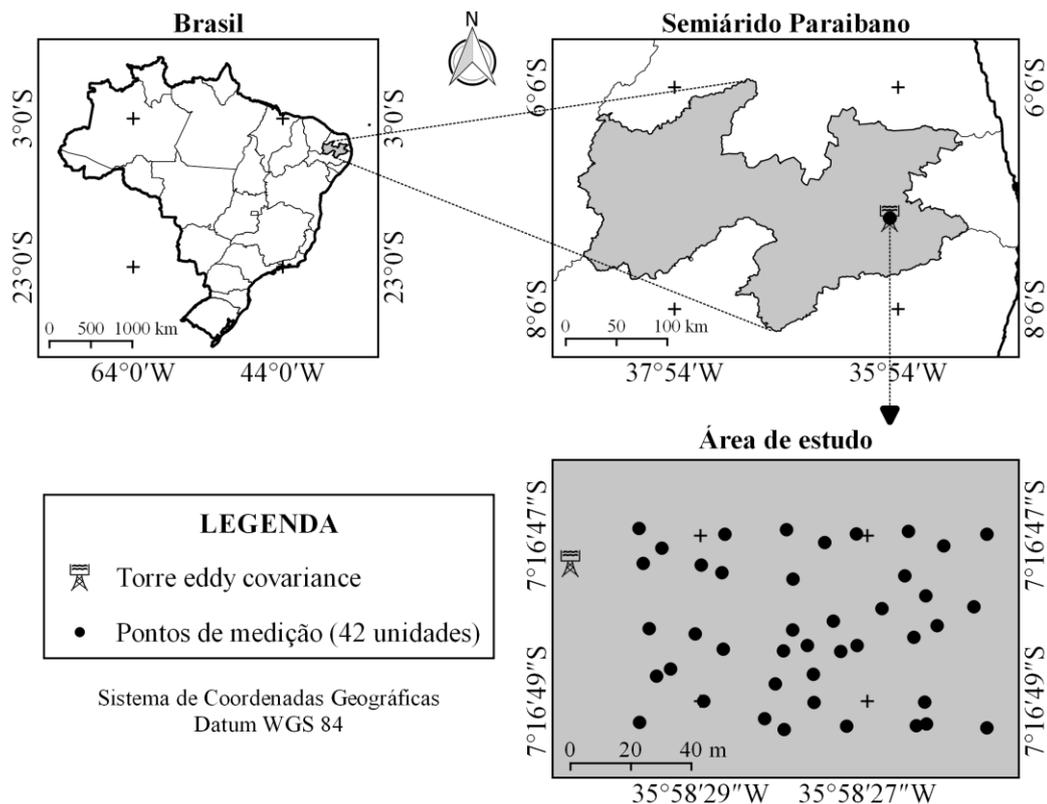
O solo foi classificado como Neossolo Litólico de acordo com o sistema brasileiro de classificação do solo (EMBRAPA, 2013), pouco profundo ( $\leq 50$  cm), pH de 5,5, muito pedregoso, textura franco arenosa e, estoques de carbono orgânico e nitrogênio total de aproximadamente 9,43 e 0,51 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, nos 10 cm superiores. As espécies arbóreas mais dominantes na área de estudo são catingueira (*Cenostigma pyramidale*), mororó (*Bauhinia cheilantha*), maniçoba (*Manihot glaziovii*) e pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), enquanto no estrato herbáceo é composto predominantemente por picão-preto (*Bidens pilosa*) e caroá (*Neoglaziovia variegata*) (Costa et al., 2019).

### 2.2 Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>), temperatura e umidade do solo

O ECO<sub>2</sub> foi medido em 42 pontos ( $n=42$ ) distribuídos aleatoriamente em uma área de aproximadamente 0,72 ha (Figura 1), no período de fevereiro de 2018 a janeiro de 2019. Para medição de ECO<sub>2</sub>, foram instalados colares de PVC (policloreto de polivinila) com diâmetro interno de 22 cm e altura de 7 cm, a uma profundidade de 3 cm no solo, uma semana antes do início das medições. O ECO<sub>2</sub> foi medido usando um sistema automatizado de fluxo de CO<sub>2</sub> (LI-8100, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA), equipado com uma câmara portátil (Modelo 8100-103).

A temperatura do solo (Ts) e o conteúdo volumétrico do solo ( $\theta_v$ ), foram monitoradas simultaneamente próximo ao colar de PVC, nas profundidades de 10 e 6 cm, respectivamente, utilizando sonda de temperatura do solo Omega (Modelo LI 8100-201) e uma sonda de umidade volumétrica do solo Theta Probe ML2x (Modelo LI 8100-204), acoplados ao LI-

8100. Dois dias antes da medição, eram retiradas as plântulas que haviam emergido dentro dos colares e removida cuidadosamente a serapilheira. O  $\text{ECO}_2$  foi medido uma única vez no mês, exceto no período de abril a junho, onde foram realizadas três campanhas de medições extras devido à maior pluviosidade, sendo todas feitas das 8:30 às 12:00 h. Por razões técnicas nem sempre foi possível efetuar as medições nos 42 pontos de amostragem.



**Figura 1.** Locais de medição de efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo distribuídos aleatoriamente em um ecossistema de Caatinga do nordeste do Brasil, 2018-2019.

### 2.3 Amostragem e análise de solo

A amostragem de solo foi realizada próximo aos colares de PVC ( $\approx 1$  m), onde foram feitas as medições de  $\text{ECO}_2$ , na camada de 0-10 cm de profundidade. As amostras foram secas ao ar e peneiradas (malha de 2 mm) para análise física e química. O pH foi medido em água (1:2,5), o carbono orgânico foi determinado via oxidação úmida com dicromato de potássio (Yeomans e Bremner, 1988) e N total pelo método de Kjeldahl (Bremner e Mulvaney, 1982). A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (Gee e Bauder, 1986) e a porosidade total estimada de acordo com a equação 1.

$$Pt = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right)$$

Onde: Pt = porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); Ds = densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), determinada segundo Patton et al. (2019); e Dp = densidade de partícula do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), assumindo-se o valor de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$  (Page-Dumroese et al., 1999).

#### 2.4 Análise dos dados

A variabilidade temporal do  $\text{ECO}_2$ , Ts e o  $\theta_v$ , foram avaliados por meio de estatística descritiva (média e desvio padrão). Para avaliar as relações entre o  $\text{ECO}_2$ , Ts e  $\theta_v$  aplicou-se análise de regressão linear. Em adição, esses modelos lineares foram complementados com a análise de árvore de regressão (Breiman et al., 1984). A análise da árvore de regressão seleciona as variáveis que melhor classificam a variável resposta ( $\text{ECO}_2$ ) em clusters distintos por meio de um processo conhecido como particionamento recursivo binário. Este é um processo iterativo de divisão dos dados em partições usando a variável preditora (Ts e  $\theta_v$ ) que explica o máximo do desvio remanescente na variável de resposta. A vantagem deste método é que a estrutura em árvore permite a interpretação visual simplificada das múltiplas interações, muitas vezes complexas entre variáveis preditoras e independentes (De'ath e Fabricius, 2000).

A dependência espacial do  $\text{ECO}_2$  foi analisada por meio dos modelos geoestatísticos e de semivariogramas através do programa R 3.3.2 (R Core Team, 2020), utilizando o pacote geoR (Ribeiro Jr. e Diggle, 2016). A função de semivariância foi calculada para todas as direções (semivariograma isotrópico) a fim de avaliar a dependência espacial dos dados conforme a equação 2:

[2]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Onde:  $\gamma(h)$  = função de semivariograma;  $Z(x)$  = valor da variável no ponto  $x$ ;  $Z(x + h)$  = valor da variável no ponto  $x + h$ ;  $N(h)$  = número de pares separados por uma distância  $h$ ; e  $x_i$  = medida da posição  $x$ .

Os modelos de semivariogramas teóricos foram ajustados usando o método dos mínimos quadrados ponderados, que foi usado anteriormente para avaliar o desempenho de três modelos de semivariogramas: esférico (Equação 3), exponencial (Equação 4) e gaussiano (Equação 5).

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ \frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right] & \text{para } 0 < h \leq A \\ C_0 + C & \text{para } h > A \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases} \quad [3]$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h}{A}\right) \right] & \text{para } 0 < h \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases} \quad [4]$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h^2}{A^2}\right) \right] & \text{para } 0 < h \\ 0 & \text{para } 0 = h \end{cases} \quad [5]$$

Onde:  $C_0$  = efeito pepita;  $C$  = variância da estrutura;  $C_0+C$  = representa a variabilidade máxima atingida e é conhecido como “patamar” (Oliver e Webster, 2014); e  $A$  = alcance [m] que representa a distância máxima na qual o  $\text{ECO}_2$  do solo exibe autocorrelação espacial.

O melhor modelo foi selecionado usando o teste de Jack-Knifing, que avalia a consistência dos dados estimados interpolando a krigagem com base em semivariogramas ajustados (dados experimentais). A estimativa é considerada adequada quando a média ( $\mu_{jk}$ ) e a variância ( $\sigma_{jk}$ ) do erro reduzido estão próximas de 0 (zero) e 1 (um), respectivamente (Vieira et al., 2010).

O grau de dependência espacial (GDE) foi obtido a partir da razão em porcentagem entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o nível determinado pela soma do efeito pepita e variação

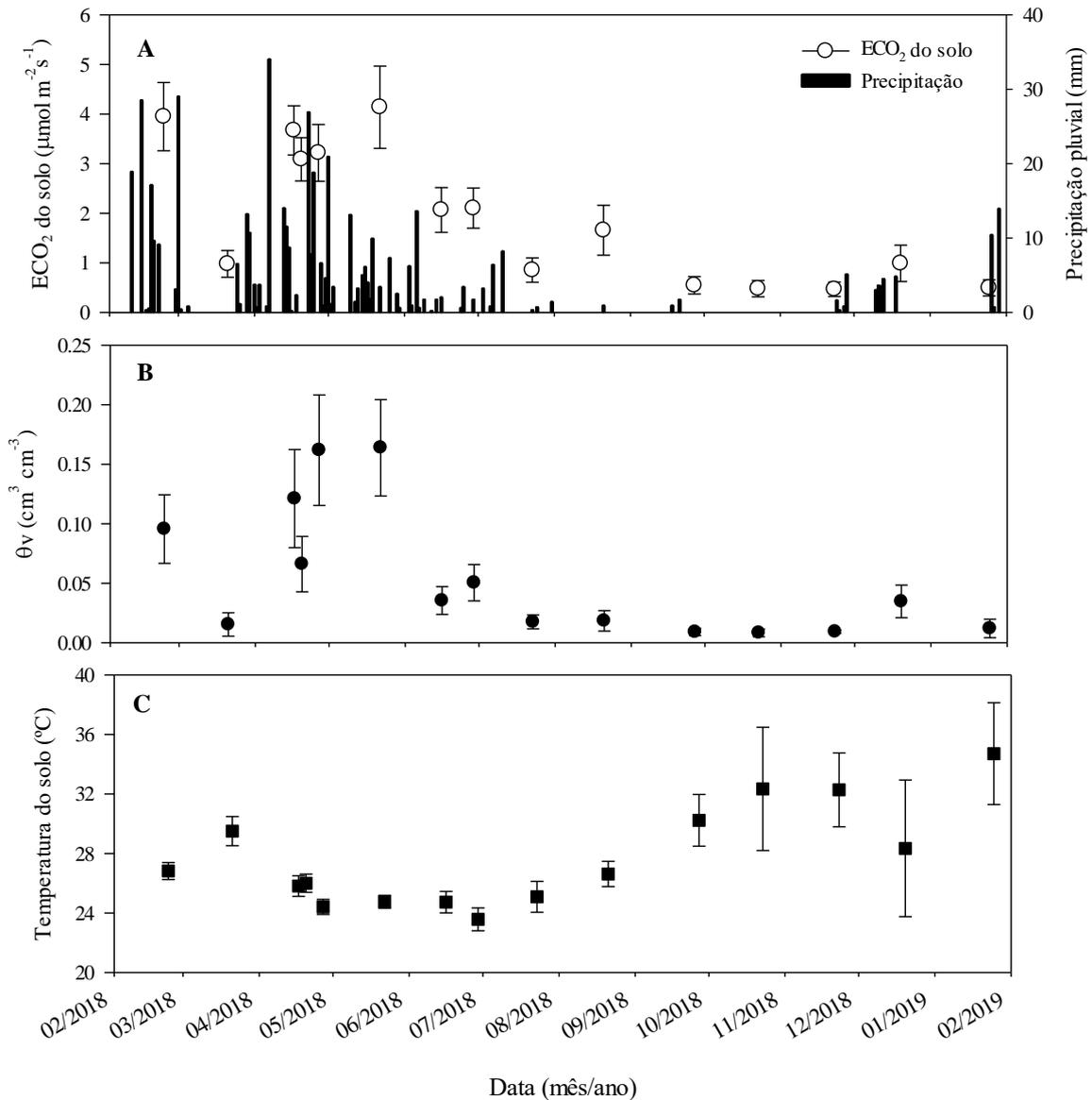
estruturada (C). O GDE foi classificado em grau de dependência espacial forte ( $GDE < 25\%$ ), moderado ( $25\% \leq GDE \leq 75\%$ ) e fraco ( $GDE > 75\%$ ) (Cambardella et al., 1994).

A relação espacial entre o  $ECO_2$  com as variáveis ambientais ( $\theta_v$  e  $T_s$ ) e os atributos do solo (COS, NTS, relação C:N, pH, areia, silte, argila, densidade do solo e porosidade total do solo) foi analisada por meio de regressão linear.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>)

O ECO<sub>2</sub> e o conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta_v$ ) apresentaram padrão sazonal semelhante, com maiores valores registrados na estação úmida e menores na estação seca. Nas estações seca e úmida, respectivamente, foram observados ECO<sub>2</sub> de  $0,47 \pm 0,15$  e de  $4,14 \pm 0,83$   $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , e conteúdos volumétricos de água do solo ( $\theta_v$ ) de  $0,01 \pm 0,003$  e  $0,16 \pm 0,05$   $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figura 2B). Com relação a temperatura do solo (Ts), foi observado o inverso, menor temperatura na estação úmida ( $23,6 \pm 0,77$  °C) e maior na estação seca ( $34,7 \pm 3,42$  °C).

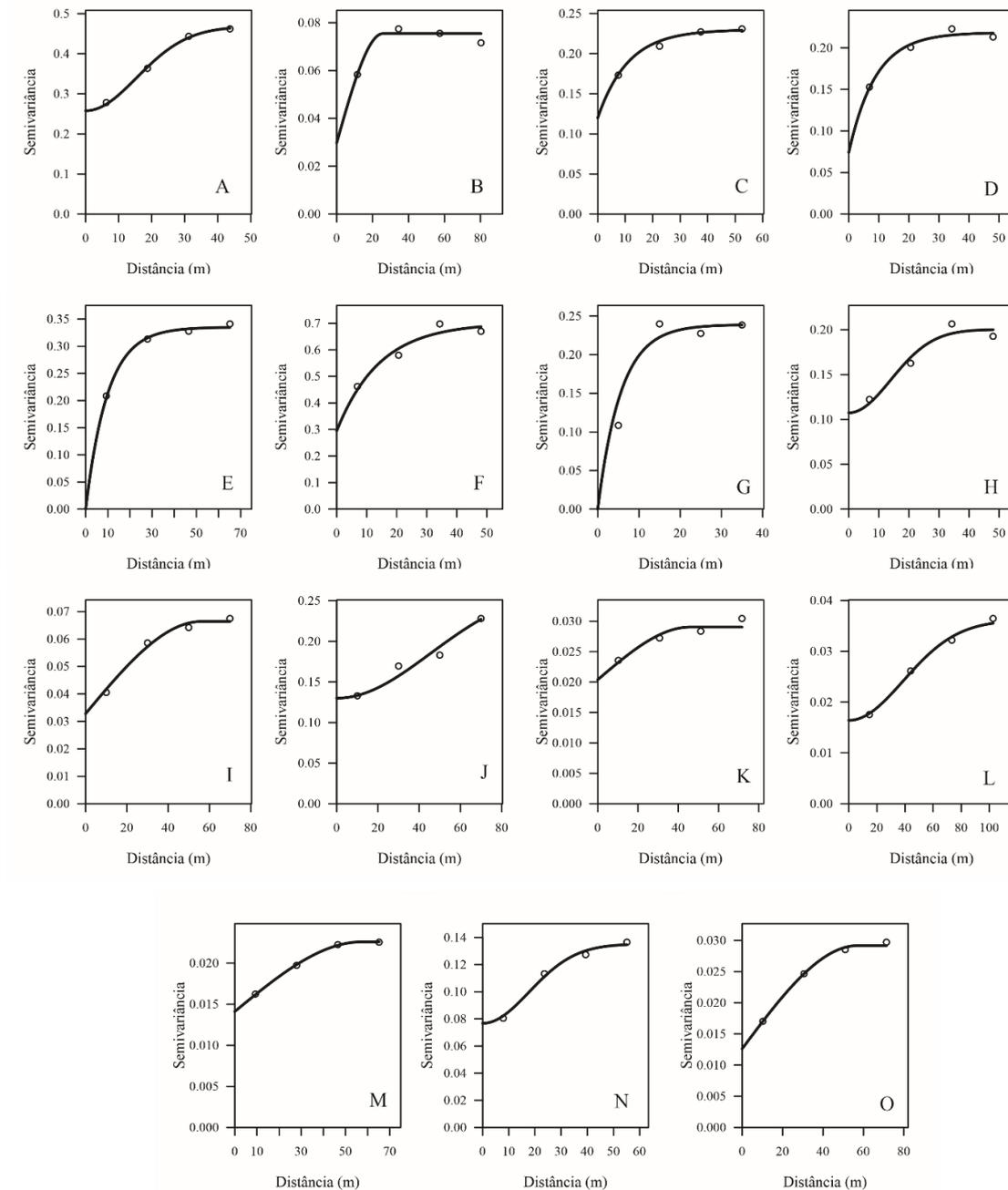


**Figura 2.** Variação temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) e da precipitação pluviual (A), variação temporal do conteúdo volumétrico de água do solo (B) e variação temporal da temperatura do solo (C), em Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. Cada ponto representa a média ± desvio padrão.

### 3.2 Análise geostatística do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>)

O modelo exponencial foi o que melhor descreveu o ECO<sub>2</sub> durante a estação úmida, ajustando-se em 5 das 7 campanhas de medições, enquanto na estação seca os melhores modelos foram o gaussiano e o esférico (Figura 3). O ECO<sub>2</sub> teve efeito pepita ( $C_0$ ) positivo em 13 de 15 campanhas de medições, sendo que 8 dessas campanhas ocorreram durante a

estação seca (Figura 3; Tabela 1). No geral os valores de patamar ( $C_0 + C$ ) foram maiores no pico da estação úmida em relação à estação seca.



**Figura 3.** Modelos teóricos de semivariogramas para o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) em diferentes datas, em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. Os parâmetros encontram-se na Tabela 1. As letras representam as datas das campanhas de medição: A - 23/02/2018, B - 21/03/2018, C - 17/04/2018, D - 20/04/2018, E - 27/04/2018, F - 22/05/2018, G - 16/06/2018, H - 29/06/2018, I - 23/07/2018, J - 21/08/2018, K - 27/09/2018, L - 23/10/2018, M - 23/11/2018, N - 20/12/2018 e O - 25/01/2019.

O grau de dependência espacial (GDE) do  $\text{ECO}_2$  variou de 0 a 70,2% (Tabela 2). Os valores de alcance do  $\text{ECO}_2$  (A) oscilaram amplamente entre as campanhas de medições, variando entre 5,6 a 64,3 m. No entanto, quando separados pela sazonalidade, verifica-se que na estação úmida os valores de alcance são menores (5,6 a 19,7 m) e apresentam menor amplitude (14,1 m), quando comparado a estação seca (16,4 e 64,3 m, e amplitude de 47,9 m). Quanto ao desempenho dos modelos, os valores de erro médio ( $\mu_{jk}$ ) próximos de 0 (zero) e da variância do erro médio reduzido ( $\sigma_{jk}$ ) próximos de 1 (um) apontam para a confiabilidade dos dados estimados pela krigagem (Tabela 1).

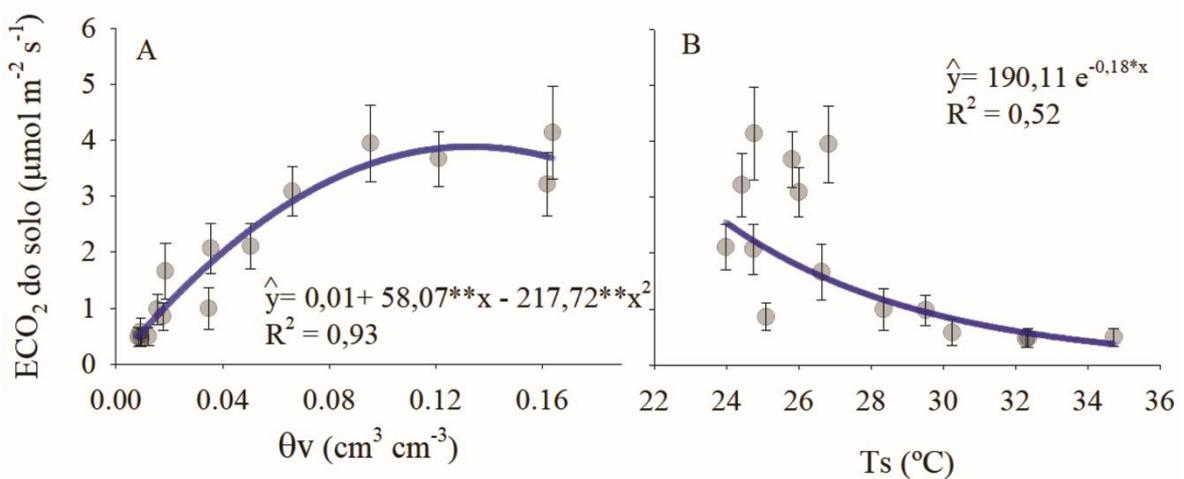
**Tabela 1.** Parâmetros de modelos ajustados e modelos de semivariogramas experimentais obtidos para efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{ECO}_2$ ), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga.

Data	Efluxo de $\text{CO}_2$ do solo							
	N	Modelo	$C_0$	$C_0+C$	A [m]	GDE	$\mu_{jk}$	$\sigma_{jk}$
23/02/2018	40	Gau	0,2103	0,4535	16,35	46,36	-0,0198	0,9818
21/03/2018	42	Esf	0,0414	0,0753	25,71	54,97	-0,0004	1,0221
17/04/2018	42	Exp	0,1100	0,2300	9,93	47,83	0,0011	1,0297
20/04/2018	41	Exp	0,0743	0,2184	8,90	34,01	0,0003	0,9194
27/04/2018	40	Exp	0,0000	0,3351	9,86	0,00	-0,0037	0,9923
22/05/2018	42	Exp	0,2948	0,7012	14,33	42,04	0,0057	1,0169
16/06/2018	42	Exp	0,0000	0,2389	5,60	0,00	0,0099	0,9265
29/06/2018	42	Gau	0,1074	0,2003	19,67	53,62	0,0049	0,9020
23/07/2018	40	Esf	0,0328	0,0663	55,93	49,48	0,0068	1,2213
21/08/2018	42	Gau	0,1300	0,2700	64,25	48,14	0,0003	0,9385
27/09/2018	39	Esf	0,0203	0,0290	45,85	70,20	0,0036	1,1111
23/10/2018	36	Gau	0,0164	0,0361	54,63	45,46	0,0104	1,3035
23/11/2018	38	Esf	0,0141	0,0225	57,29	62,49	0,0051	1,0936
20/12/2018	41	Gau	0,0767	0,1351	25,06	56,78	0,0108	1,2903
25/01/2019	31	Esf	0,0126	0,0291	57,10	43,29	-0,0070	1,2605

Esf – esférico, Exp – exponencial, Gau – Gaussiano,  $C_0$  – efeito pepita,  $C_0+C$  – patamar, GDE – grau de dependência espacial (%), A (m) – alcance,  $\mu_{jk}$  – erro médio e  $\sigma_{jk}$  – variância do erro médio reduzido da validação cruzada.

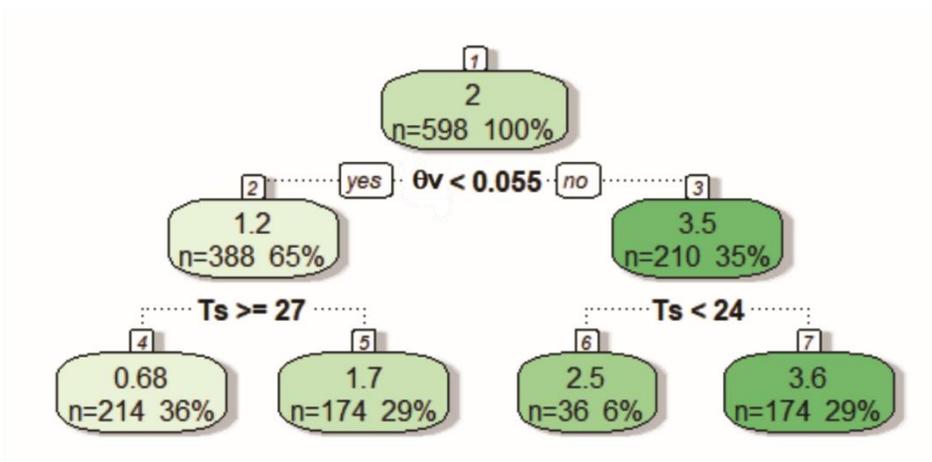
### 3.3 Fatores controladores da variabilidade temporal do efluxo de $\text{CO}_2$ do solo ( $\text{ECO}_2$ )

Uma consistente relação quadrática e significativa ( $P < 0,01$ ) entre o  $\theta_v$  e o  $\text{ECO}_2$  explica cerca de 93% da variabilidade temporal, mostrando-se ser mais importante do que a  $T_s$  (Figura 4A). Por meio da derivada da equação de regressão estimou-se que o pico de  $\text{ECO}_2$  ocorreu quando o  $\theta_v$  foi de aproximadamente  $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Por outro lado, uma relação não linear, negativa e significativa ( $P < 0,05$ ) encontrada entre a  $T_s$  e  $\text{ECO}_2$  explica cerca de 52% da variação temporal do  $\text{ECO}_2$  no local estudado (Figura 4B).



**Figura 4.** Relações entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) com o conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ) (A) e temperatura do solo (Ts) (B), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga. \*, \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

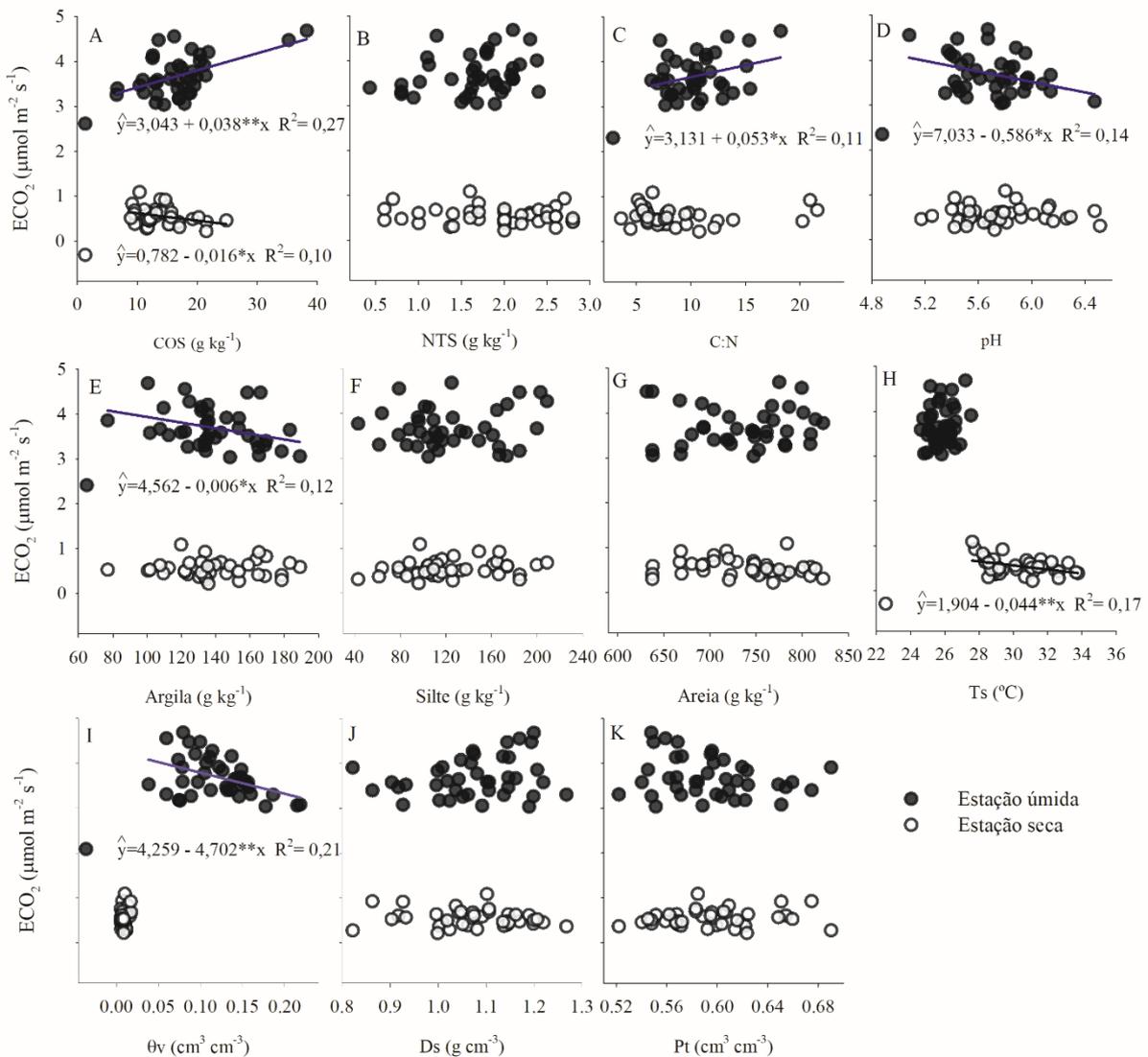
A análise da árvore de regressão, realizada usando a  $\theta_v$  e Ts como variáveis predictoras para o ECO<sub>2</sub>, identificou a  $\theta_v$  como a variável independente mais importante para separar os maiores e menores valores de ECO<sub>2</sub>, com um valor crítico de  $\approx 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , enquanto a Ts é secundária (Figura 5). Valores de  $\theta_v < 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  com Ts  $\geq 27^\circ\text{C}$  foram associadas às menores taxas ( $< 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) de ECO<sub>2</sub>. Em contrapartida, valores de  $\theta_v > 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  com Ts  $> 24^\circ\text{C}$  foram associadas às maiores taxas ( $> 3,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) de ECO<sub>2</sub>. O coeficiente de determinação entre os valores observados de ECO<sub>2</sub> e os valores estimados pela árvore de regressão foi de 87%.



**Figura 5.** Árvore de regressão da relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>), conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ) e temperatura do solo (Ts) (N = 598; as medições são de fevereiro de 2018 a janeiro de 2019), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga.

### 3.4 Fatores controladores da variabilidade espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>)

As análises de regressão entre o ECO<sub>2</sub>,  $\theta_v$ , Ts e os atributos do solo (físicos e químicos), durante estação úmida, identificaram relações positivas significativas entre o ECO<sub>2</sub> e a concentração de COS ( $R^2 = 0,27$ ,  $P < 0,01$ ; Figura 6A), relação C:N ( $R^2 = 0,11$ ,  $P < 0,05$ ; Figura 6C) e negativa com pH do solo ( $R^2 = 0,14$ ,  $P < 0,01$ ; Figura 6D), conteúdo de argila ( $R^2 = 0,12$ ,  $P < 0,05$ ; Figura 6E) e  $\theta_v$  ( $R^2 = 0,21$ ,  $P < 0,01$ ; Figura 6I). Em contraste, durante a estação seca houve relações negativas entre o ECO<sub>2</sub> e a concentração de COS ( $R^2 = 0,10$ ,  $P < 0,05$ ; Figura 6A) e Ts ( $R^2 = 0,17$ ,  $P < 0,05$ ; Figura 6H).



**Figura 6.** Relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> (ECO<sub>2</sub>),  $\theta_v$ , Ts e os atributos do solo, em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga durante a estação úmida e seca (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J e K). \*, \*\* significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Variabilidade temporal do efluxo de $CO_2$ do solo ( $ECO_2$ )

No presente estudo, o  $ECO_2$  exibiu um claro padrão sazonal. Os valores de  $ECO_2$  foram maiores durante a estação úmida devido ao maior  $\theta_v$ , e menores na estação seca por causa das altas  $T_s$  associadas ao  $\theta_v$  menor. Padrão sazonal semelhante também foi relatado em outros estudos realizados em solos sob Caatinga (Ferreira et al., 2018; Lima et al., 2020; Santos et al., 2020), e em outros ecossistemas semiáridos (Tang e Baldochi, 2005; Makhado e Scholes, 2011; Leon et al., 2014).

### 4.2 Análise geoestatística do efluxo de $CO_2$ do solo ( $ECO_2$ )

Os modelos teóricos que descreveram a variabilidade espacial do  $ECO_2$  diferiram entre as campanhas de medição, com predominância do modelo exponencial na estação úmida e dos modelos gaussiano e esférico na estação seca. O modelo exponencial descreve fenômenos em pequena escala nitidamente descontínuos, refletindo pontos quentes e frios. O modelo gaussiano descreve fenômenos com grande continuidade em múltiplas escalas, enquanto o modelo esférico, por apresentar um patamar bem definido, descreve fenômenos em grande escala com mudanças abruptas (Ettema e Wardle, 2002).

Nesse sentido, os resultados indicam que a variabilidade espacial do  $ECO_2$  na área estudada ocorre em pequena escala na estação úmida e varia entre múltiplas e grandes escalas na estação seca. Esses resultados diferem daqueles encontrados por Leon et al. (2014), quando observaram ajuste do modelo esférico para a estação úmida e seca em um ecossistema semiárido do México. Contudo, outros estudos também mostraram que a variabilidade espacial do  $ECO_2$  foi descrita por diferentes modelos (esférico, exponencial, linear, gaussiano), dependendo da estação (Ohashi e Gyokusen, 2007; Fóti et al., 2014, Fóti et al., 2018).

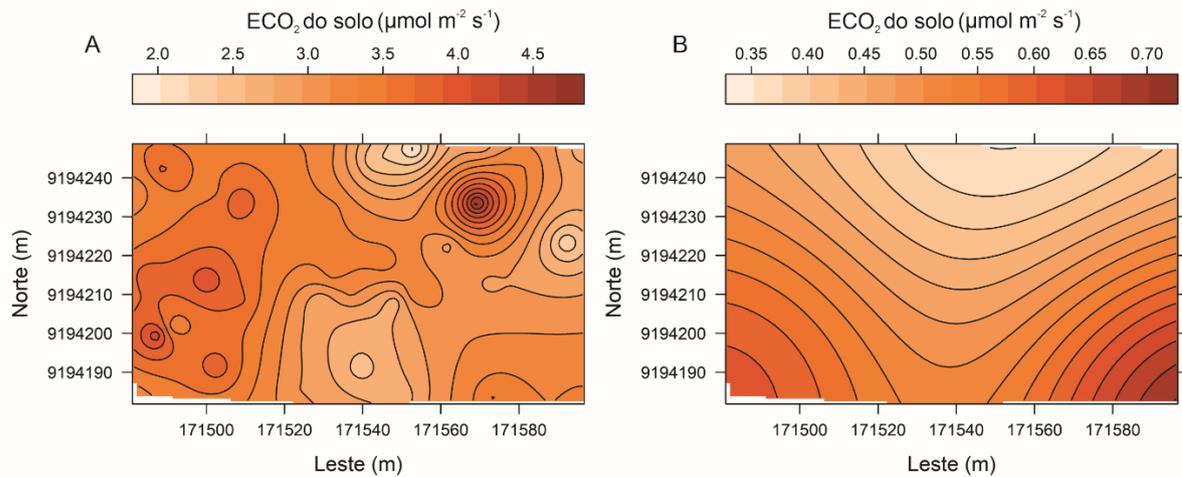
O grau de dependência espacial (GDE), obtido pela relação entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0+C$ ) foi forte para duas campanhas de medições da estação úmida e moderado para as demais. Outros estudos também tiveram grau de dependência espacial variando de moderado a forte, dependendo da sazonalidade ou estações do ano (Kosugi et al., 2007; Ohashi e Gyokusen, 2007; Fóti et al., 2014). Enquanto outros mostraram grau de dependência

espacial exclusivamente fraco (Acosta et al., 2017), ou forte (Han et al., 2019) ou moderado (Leon et al., 2014).

Os valores de alcance do  $\text{ECO}_2$  variaram de 5,6 m (estação úmida) a 64,3 m (estação seca) (Tabela 1) na área em estudo (0,72 ha), esses valores são mais amplos do que os 4,4 e 24,7 m encontrados em uma área de 0,25 ha de floresta tropical úmida (Kosugi et al., 2007). Han et al. (2019) estudaram a variabilidade espacial e temporal do  $\text{ECO}_2$  em uma área de 9 ha sob floresta e identificaram valores de alcance entre 10,2 e 16,8 m. Em trabalho realizado por Leon et al. (2014), em uma área de ecossistema semiárido um pouco menor (0,5 ha) que a área em estudo, os valores de alcance foram de 42 e 54 m encontrados para estação úmida e seca, respectivamente. Essas diferenças ocorrem porque a distância de autocorrelação depende do tamanho da parcela e da distância entre os pontos amostrais (Prolingheuer et al., 2014).

Os resultados mostram que os valores de alcance variam temporalmente, com menores distâncias de autocorrelação espacial ocorrendo durante a estação úmida e maiores durante a estação seca. Logo, a amostragem do  $\text{ECO}_2$  deve se adequar às mudanças que ocorrem nas distâncias de autocorrelação espacial de acordo com a sazonalidade. Os resultados indicam que no local estudado as distâncias entre os pontos de amostragem devem ter mais do que 5,6 m na estação úmida e mais do que 64,3 m na estação seca, logo, recomenda-se uma distância maior do que 64,3 m para contemplar ambas as estações. Mudanças nas distâncias de autocorrelação espacial induzidas pela umidade do solo também foram constatadas por Fóti et al. (2014) em um ecossistema semiárido.

Os mapas de superfície derivados da krigagem mostram o padrão do  $\text{ECO}_2$  para duas campanhas de medição (20/04/2018 e 23/10/2018), uma realizada na estação úmida (Figura 7A) e outra na estação seca (Figura 7B). O mapa da área indica uma maior descontinuidade da distribuição espacial do  $\text{ECO}_2$  na estação úmida do que na estação seca, como confirmado pela menor distância de autocorrelação espacial (Tabela 2). A maior heterogeneidade na estação úmida pode ser atribuída à alta atividade metabólica tanto das espécies vegetais quanto dos microrganismos, ao passo que durante a estação seca, a maioria das espécies vegetais perdem as folhas e entram em estado de latência e a atividade microbiana diminui, por causa da limitação hídrica.



**Figura 7.** Padrões espaciais gerados pela krigagem do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) para a estação úmida (A) e a estação seca (B), em um Neossolo Litólico sob floresta de Caatinga.

#### 4.3 Fatores controladores da variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>)

A umidade do solo tem sido amplamente citada na literatura, como um dos principais controladores da variabilidade temporal do ECO<sub>2</sub> em outros ecossistemas semiáridos (Adachi et al., 2009; Leon et al., 2014; Lima et al., 2020). A relação entre o  $\theta_v$  e a ECO<sub>2</sub> pode ser descrita por uma curva que tem mínimos em ambos os extremos de umidade e um máximo em algum teor de umidade, onde o equilíbrio da disponibilidade de água e oxigênio é ótimo (Moyano et al., 2013). Nesse sentido, os resultados sugerem que o solo do local estudado tem seu ponto ótimo em um  $\theta_v$  de aproximadamente  $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , onde foi registrado o pico de ECO<sub>2</sub>. Outros estudos relataram taxas máximas de ECO<sub>2</sub> ocorrendo em  $\theta_v$  variando de  $0,17$  a  $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Hanpattanakit et al., 2009; Butler et al., 2012; Rubio e Detto, 2017), o que pode ser atribuído a diferenças na porosidade do solo.

Quanto a relação negativa entre a Ts e o ECO<sub>2</sub>, mesmo já tendo sido relatada em outros estudos (Hanpattanakit et al., 2009; Lima et al., 2020), vai na contramão da bem reconhecida relação exponencial positiva encontrada entre a Ts e ECO<sub>2</sub> em muitos ecossistemas (Lloyd e Taylor, 1994; Wang et al., 2014). A redução do ECO<sub>2</sub> com o aumento da Ts no local estudado ocorre, porque o aumento da Ts coincide com a diminuição da  $\theta_v$ , o que está de acordo com outros estudos realizados em ecossistemas semiáridos (Makhado e Scholes, 2011; Lima et al., 2020). Sob essa condição a atividade microbiana nos solos é limitada devido a redução das populações microbiana, conseqüentemente, há também redução na decomposição de resíduos orgânicos e na respiração do solo (Lima et al., 2020).

No entanto, é importante destacar que a combinação entre a  $T_s$  de  $\approx 25^\circ\text{C}$ , temperatura considerada ótima para atividade microbiana (Conant et al., 2004; Makhado et al., 2011), e o  $\theta_v$  próximo da faixa ótima (0,06 a 0,13  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), resulta em maiores taxas de  $\text{ECO}_2$ , como pode ser observado na figura 5B, por meio dos pontos que não se enquadram no modelo. Essa afirmação é corroborada pelo resultado da árvore de regressão (Figura 6), onde a maior taxa de  $\text{ECO}_2$  ocorre quando a  $T_s$  está acima dos  $24^\circ\text{C}$  e a  $\theta_v$  acima do valor crítico de aproximadamente  $\approx 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

O resultado da árvore de regressão, tendo a  $\theta_v$  como variável independente mais importante para explicar o  $\text{ECO}_2$  no local estudado, difere dos resultados obtidos por Leon et al. (2014), que teve a  $T_s$  como principal variável para explicar o  $\text{ECO}_2$  em um ecossistema semiárido do México. A provável explicação para essa diferença é a amplitude muito menor da  $T_s$  no local estudado (Figura 2C). Por outro lado, corrobora com Vargas et al. (2010), avaliando os controles biofísicos do  $\text{ECO}_2$  coberto por grasslands, e com Sullivan et al. (2015), estudando os fatores controladores dos fluxos de gases de efeito estufa do solo, ambos em região semiárida. Portanto, o nível de influência de cada fator varia de acordo com as características ambientais, inerentes de cada região.

#### *4.4 Fatores controladores da variabilidade espacial do efluxo de $\text{CO}_2$ do solo ( $\text{ECO}_2$ )*

Neste estudo, a  $T_s$ ,  $\theta_v$  e os atributos físicos e químicos do solo foram avaliados quanto à sua influência na variabilidade espacial do  $\text{ECO}_2$  em uma floresta de Caatinga, durante a estação úmida e seca. A relação positiva entre o  $\text{ECO}_2$  e a concentração de COS na estação úmida pode ser explicada pela maior disponibilidade de substrato para os microrganismos (respiração heterotrófica), proveniente tanto da maior atividade das plantas, quanto do material orgânico que foi aportado ao solo durante estação seca, como constatado por Costa (2019) em pesquisa realizada na mesma área. Outros estudos relataram a relação positiva entre o  $\text{ECO}_2$  e a concentração de COS (Oyonarte et al., 2012; Chen et al., 2010). Já a relação positiva entre o  $\text{ECO}_2$  e a relação C:N, na estação úmida, deve-se provavelmente ao melhor consumo de carbono com um aumento de C:N sob condições não limitantes de nitrogênio (Tian et al., 2019).

Geralmente, em solos ácidos há um aumento do  $\text{ECO}_2$  com a elevação do pH do solo (Andersson e Nilsson, 2001), enquanto o inverso é verdadeiro para solos alcalinos (Colman e Schimel, 2013). No local estudado mesmo o solo apresentando-se ácido, os resultados mostram uma diminuição do  $\text{ECO}_2$  com o aumento do pH do solo (Figura 6D). Esse

comportamento também foi observado em estudos anteriores realizados em diferentes ecossistemas (Epron et al., 2006; Curtois et al., 2018; Jiang et al., 2020). Portanto, o efeito do pH sozinho no controle do  $\text{ECO}_2$  ainda é controverso, mas alguns estudos mostram sua interação com outros atributos do solo como, matéria orgânica, umidade do solo e temperatura do solo (Vahalana, 2002; Reth et al., 2005).

A relação negativa entre o  $\text{ECO}_2$  e o conteúdo de argila, durante a estação úmida, pode ser atribuída ao maior volume de microporos, que por sua vez diminui a taxa de infiltração de água no solo (Yang et al., 2018). Essa diminuição associada a alta umidade do solo, pode levar à redução da difusão gasosa (Lohila et al., 2003), tendo em vista que a taxa de difusão das moléculas de  $\text{CO}_2$  depende do conteúdo de água do solo, bem como de sua porosidade total (Bouma et al., 2000).

A importância da  $\theta_v$  na variabilidade espacial do  $\text{ECO}_2$  foi bem menor que a observada em relação a variabilidade temporal (Figura 4), explicando apenas 21% da variabilidade. Observa-se a diminuição do  $\text{ECO}_2$  com o aumento da  $\theta_v$ , provavelmente por causa das condições anaeróbias que suprime a atividade microbiana quando o conteúdo de água no solo supera o ponto crítico (Liptzin et al., 2010). Essa afirmação é sustentada por inúmeros estudos que relataram a influência negativa da  $\theta_v$  no  $\text{ECO}_2$  em condições de alta umidade (Adachi et al., 2006; Kosugi et al., 2007; Adachi et al., 2009).

Durante a estação seca, o  $\text{ECO}_2$  relacionou-se negativamente com a concentração de  $\text{CO}_2$  e  $T_s$ . Às complexas interações entre os fatores que influenciam o  $\text{ECO}_2$  e a variabilidade espacial resulta às vezes em achados contraditórios (Martin e Bolstad, 2009), de modo que sob essas circunstâncias o efeito de cada um desses fatores pode não ser explicado individualmente. Por exemplo, a diminuição do  $\text{ECO}_2$  com o aumento da  $T_s$  ocorre porque a alta  $T_s$  geralmente é acompanhada por baixa  $\theta_v$ , sob essa condição a temperatura exerce um efeito supressor sobre a respiração do solo (Inoue e Koizumi, 2012). Isso está de acordo com Oyonarte et al. (2012) quando avaliaram a variabilidade espacial e os fatores controladores da respiração do solo em um ecossistema árido da Espanha.

A variabilidade espacial do  $\text{ECO}_2$  é mais complexa do que a variabilidade temporal, que tem a  $\theta_v$  ou  $\theta_v$  mais  $T_s$  como excelentes preditores, uma vez que nenhum atributo do solo ou variável ambiental, de forma individual, foi capaz de explicar a variabilidade espacial (total ou em parte), principalmente na estação seca. Muitos estudos têm observado que a variabilidade espacial do  $\text{ECO}_2$  é controlada por inúmeros fatores tanto bióticos quanto abióticos (Chen et al., 2010; Leon et al., 2014; Shi et al., 2019; Jiang et al., 2020). Portanto, além dos atributos avaliados deve-se considerar em estudos futuros a inclusão de variáveis

como área basal (Pennington et al., 2020), índice de área foliar e biomassa radicular (Leon et al., 2014), biomassa microbiana e nutrientes (Xiao et al., 2020), topografia (Tian et al., 2019), frações da matéria orgânica do solo (Oyonarte et al., 2012), entre o outras.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo revelou que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) no local estudado varia de 0,47 a 4,14 μmol de CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, nas estações seca e úmida, respectivamente. Individualmente, o conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta_v$ ) e a temperatura do solo (Ts) explicam, respectivamente, 98% e 52% desta variabilidade. As relações não lineares entre o conteúdo volumétrico de água do solo e a temperatura do solo explicam 87% da variabilidade.

As distâncias de autocorrelação espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) variam com a sazonalidade, de 5,6 m na estação úmida a 64,3 na estação seca, com dependência espacial de forte a moderada. Portanto, para regiões com as mesmas características da área em estudo, recomenda-se uma distância maior do que 64,3 m, para que as medições sejam consideradas estatisticamente independentes.

Na estação úmida, a variabilidade espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) tem relação positiva com o conteúdo de COS e relação C:N e negativa com o pH, argila, conteúdo de umidade volumétrica do solo ( $\theta_v$ ). Na estação seca, a variabilidade espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (ECO<sub>2</sub>) tem relação negativa com o conteúdo de COS e temperatura do solo (Ts).

De forma individual, nenhum dos atributos do solo (químicos ou físicos) e variáveis ambientais (conteúdo de umidade volumétrica do solo e temperatura do solo) foi capaz de explicar a variabilidade espacial do ECO<sub>2</sub> (principalmente na estação seca), mesmo apresentando relação com o ECO<sub>2</sub>. Neste contexto, recomenda-se estudos com modelagem, uma vez que, a variabilidade espacial do ECO<sub>2</sub> no local estudado é complexa e controlada por múltiplos fatores.

## 6. REFERÊNCIAS

- Acosta, M., Darenova, E., Dušek, J., Pavelka, M., 2017. Soil carbon dioxide fluxes in a mixed floodplain forest in the Czech Republic. *European Journal of Soil Biology* 82, 35-42. doi:10.1016/j.ejsobi.2017.08.006.
- Adachi, M., Bekku, Y.S., Kadir, W.R., Okuda, T. Koizumi, H., 2006. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology* 34, 258-265.
- Adachi, M., Ishida, A., Bunyavejchewin, S., Okuda, T., Koizumi, H., 2009. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology* 25, 531-539.
- 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, 711-728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Andersson, S., Nilsson, S.I., 2001. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus. *Soil Biology Biochemistry* 33, 1181-1191. doi:10.1016/S0038-0717(01)00022-0.
- ArchMiller, A. A., Samuelson, L. J., Li, Y., 2016. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest. *Plant and Soil* 403, 419-435. doi:10.1007/s11104-016-2817-1.
- Bouma, T.J., Bryla, D.R., 2000. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO<sub>2</sub> concentrations. *Plant and Soil* 227, 215-221. doi:10.1023/A:1026502414977.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J. *Classification and Regression Trees*. 1984. Wadsworth & Brooks/Cole, Monterey, CA, USA.
- Bremner, J.M., Mulvaney, R.G. Nitrogen total. In: Page, A.L.; Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 575-624.
- Butler, A., Meir, P., Saiz, G., Maracahipes, L., Marimon, B.S., Grace, J., 2012. Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. *Plant Soil* 352, 129-142. doi:10.1007/s11104-011-0984-7.

- Cambardella, C.A., Karlen, D.L., 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture* 1, 5-14.
- Chen, Q., Wang, Q., Han, X., Wan, S., Li, L., 2010. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China. *Global Biogeochemical Cycle* 24, GB2010. doi:10.1029/2009GB003538.
- Colman, B.P., Schimel, J.P., 2013. Drivers of microbial respiration and net N mineralization at the continental scale, *Soil Biology Biochemistry* 60, 65-76. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.01.003.
- Conant, R.T., Dalla-Betta, P., Klopatek, C.C., Klopatek, J.M., 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils, *Soil Biology and Biochemistry* 36, 945-951.
- Costa, C.R.G. Dinâmica temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> e produção de glomalina em área de Caatinga sob Neossolo Litólico. 2019. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2019.
- Courtois, E. A., Stahl, C., Van den Berge, J., Bréchet, L., Van Langenhove, L., Richter, A., Urbina, I., Soong, J.L., Peñuelas, J., Janssens, I. A., 2018. Spatial Variation of Soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Fluxes Across Topographical Positions in Tropical Forests of the Guiana Shield. *Ecosystems* 21, 1445-1458. doi:10.1007/s10021-018-0232-6.
- De'ath G., Fabricius, K.E., 2000. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81, 3178-3192.
- Ebrahimi, M., Sarikhani, M. R., Safari S.A.A., Ahmadi, A., Keesstra, S., 2019. Estimating the soil respiration under different land uses using artificial neural network and linear regression models. *Catena* 174, 371-382. doi:10.1016/j.catena.2018.11.035.
- EMBRAPA, 2013. Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, 2013. Rio de Janeiro, 3<sup>rd</sup> ed. (353 pp.).
- Epron, D., Bosc, A., Bonal, D., Freycon, V., 2006. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. *Journal Tropical Ecology* 22, 565-574.
- Ettema, C., Wardle, D.A., 2002. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 17, 177-183. doi:10.1016/s0169-5347(02)02496-5.

Ferreira, C.R.P.C., Antonino, A.C.D., Sampaio E.V.S.B., Correia, K.G., Lima, J.R.S., Soares, W.A., Menezes, R., 2018. Soil CO<sub>2</sub> efflux measurements by alkali absorption and infrared gas analyzer in the Brazilian semiarid region. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42, e0160563. doi: 10.1590/18069657rbc20160563.

Fóti, S., Balogh, J., Nagy, Z., Herbst, M., Pintér, K., Péli, E., Koncz, P., Bartha, S., 2014. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. *Geoderma* 213, 245-254.

Fóti, S., Balogh, J., Papp, M., Koncz, P., Hidy, D., Csintalan, Z., Kertesz, P., Bartha, S., Zimmermann, Z., Biró, M., et al., 2018. Temporal Variability of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Flux Spatial Patterns at a Mowed and a Grazed Grassland. *Ecosystems* 21, 112-124. doi.org/10.1007/s10021-017-0138-8.

Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, pp. 383-411.

Han, M., Shi, B., Jin, G., 2019. Spatial patterns of soil respiration in a spruce-fir valley forest, Northeast China. *Journal of Soils and Sediments* 9, 10-22. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2018-z>.

Hanpattanakit, P., Panuthai, S., Chidthaisong, A., 2009. Temperature and moisture controls of soil respiration in a dry Dipterocarp forest, Ratchaburi Province. *Kasertsart Journal* 43, 650-661.

Inoue, T., Koizumi, H., 2012. Effects of environmental factors upon variation in soil respiration of a *Zoysia japonica* grassland, central Japan. *Ecology Research* 27, 445-452.

IPCC. 2013. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jiang, Y., Zhang, B., Wang, W., Li, B., Wu, Z., Chu, C., 2020. Topography and plant community structure contribute to spatial heterogeneity of soil respiration in a subtropical forest. *Science of The Total Environment*, 139287. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139287.

- Knohl, A., Sørensen, A.R.B., Kutsch, W.L., Gockede, M., Buchmann, N., 2008. Representative estimates of soil and ecosystem respiration in an old beech forest. *Plant and Soil* 302, 189-202. doi.org/10.1007/s11104-007-9467-2.
- Kosugi, Y., Mitani, T., Itoh, M., Noguchi, S., Tani, M., Matsuo, N., Takanashi, S., Ohkubo, S., Rahim Nik, A., 2007. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 147, 35-47.
- Leon, E., Vargas, R., Bullock, S., Lopez, E., Panosso, A. R., La Scala, N., 2014. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO<sub>2</sub> efflux in a water-limited ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 77, 12-21. doi:10.1016/j.soilbio.2014.05.029.
- Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Santos, E.S., Souza, E.S., Oliveira, J.E.S., Medeiros, E.V., Pessoa, L.G.M., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., 2020. Impacts of land use changes on soil respiration in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44, e0200092. doi:10.36783/18069657rbcs20200092.
- Liptzin, D., Silver, W.L., Detto, M., 2010. Temporal dynamics in soil oxygen and greenhouse gases in two humid tropical forests. *Ecosystems* 14, 171-182.
- Lloyd, J., Taylor, J.A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8, 315e323.
- Lohila, A., Aurela, M., Regina, K., Laurila, T., 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil* 251, 303-317. doi.org/10.1023/A:1023004205844.
- Luo, Y., Zhou, X. Soil respiration and the environment. Elsevier, San Diego, 316p. 2006.
- Makhado, R.A., Scholes, R.J., 2011. Determinants of soil respiration in a semi-arid savanna ecosystem, Kruger National Park, South Africa. *Koedoe* 53, 1-8. doi:10.4102/koedoe.v53i1.1041.
- Martin, J.G., Bolstad, P.V., 2009. Variation of soil respiration at three spatial scales: components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape. *Soil Biology Biochemistry* 41, 530-543.
- Martins, E.L. Variação sazonal de estoques e fluxos de nutrientes em áreas sob caatinga e pastagem em solo da região semiárida. 2012. 52p. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo e Água) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012.

- Moyano, F. E., Manzoni, S., Chenu, C., 2013. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry* 59, 72–85. doi:10.1016/j.soilbio.2013.01.002.
- Ohashi, M., Gyokusen, K., 2007. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 1130-1138.
- Oliver, M.A., Webster, R., 2014. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. *Catena* 113, 56-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>.
- Oyonarte, C., Rey, A., Raimundo, J., Miralles, I., Escribano, P., 2012. The use of soil respiration as an ecological indicator in arid ecosystems of the SE of Spain: Spatial variability and controlling factors. *Ecological Indicators* 14, 40-49. doi:10.1016/j.ecolind.2011.08.013.
- Page-Dumroese, D.S., M.F. Jurgensen, R.E. Brown, and G.D. Mroz., 1999. Comparison of methods for determining bulk densities of rocky forest soils. *Soil Science Society of American Journal* 63, 379-383. doi:10.2136/sssaj1999.03615995006300020016x.
- Patton, N.R., Lohse, K.A., Seyfried, M.S., Will, R., S. Benner., 2019. Lithology and coarse fraction adjusted bulk density estimates for determining total organic carbon stocks in dryland soils. *Geoderma* 337, 844-852. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.036.
- Pennington, S.C., McDowell, N.G., Megonigal, J.P., Stegen, J.C., Bond-Lamberty, B., 2020. Localized basal area affects soil respiration temperature sensitivity in a coastal deciduous forest. *Biogeosciences* 17, 771-780. doi:10.5194/bg-17-771-2020.
- Prolingheuer, N., Scharnagl, B., Graf, A., Vereecken, H., Herbst, M., 2014. On the spatial variation of soil rhizospheric and heterotrophic respiration in a winter wheat stand. *Agricultural and Forest Meteorology* 195, 24-31.
- R Core Team., 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.
- Reth, S., Reichstein, M., Falge, E., 2005. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux - A modified model. *Plant and Soil* 268, 21-33. doi:10.1007/s11104-005-0175-5.
- Ribeiro P.J., Jr, Diggle, P.J., 2016. GeoR: analysis of geostatistical data. R Package Version 1.7-5.2. <https://CRAN.R-project.org/package=geoR>.

- Rubio, V.E., Detto, M., 2017. Spatiotemporal variability of soil respiration in a seasonal tropical forest. *Ecology Evolution* 7, 7104-7116. doi:10.1002/ece3.3267.
- Santana, M.S., de Sá Barretto Sampaio, E.V., Giongo, V., Menezes, R.S.C., de Jesus, K.N., de Albuquerque, E.R.G.M., do Nascimento, D.M., Pareyn, F.G.C., Cunha, T.J.F., Sampaio, R.M.B., et al., 2019. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. *Geoderma Regional*, e00205. doi:10.1016/j.geodrs.2019.e00205.
- Santos, É. M. da C., Araújo, K. D., Souza, M. A., Gomes, D. L., Lira, E. dos S., Guimarães Júnior, S. A. M., Costa, J. G. da., 2020. Relief and edaphoclimatic conditions as influencing agents of CO<sub>2</sub> release in Alagoas Caatinga, Brazil. *Soil Research* 58, 306-313. doi:10.1071/sr19156.
- Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., Sanaullah, M., Heitkamp, F., Zelenev, V., Kumar, A., Blagodatskaya, E., 2017. Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: mechanisms and thresholds. *Biology and Fertility of Soils* 53, 287-301. doi:10.1007/s00374-016-1174-9.
- Shi, B., Gao, W., Cai, H., Jin, G., 2016. Spatial variation of soil respiration is linked to the forest structure and soil parameters in an old-growth mixed broad leaved-Korean pine forest in northeastern China. *Plant and Soil* 400, 263-274. doi:10.1007/s11104-015-2730-z.
- Shi, B., Xu, W., Zhu, Y., Wang, C., Loik, M. E., Sun, W., 2019. Heterogeneity of grassland soil respiration: Antagonistic effects of grazing and nitrogen addition. *Agricultural and Forest Meteorology* 268, 215-223. doi:10.1016/j.agrformet.2019.01.028.
- Stoyan, H., De-Polli, H., Bohm, S., Robertson, G.P., Paul, E.A., 2000. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant Soil* 222, 203-214.
- Sullivan, B.W., Nasto, M.K., Hart, S.C., Hungate, B.A., 2015. Proximate controls on semiarid soil greenhouse gas fluxes across 3 million years of soil development. *Biogeochemistry* 125, 375-391. doi:10.1007/s10533-015-0133-0.
- Takahashi, M., Hirai, K., Limtong, P., Leungvutivirog, C., Panuthai, S., Suksawang, S., Anusontpornperm, S., Marod, D. 2011. Topographic variation in heterotrophic and autotrophic soil respiration in a tropical seasonal forest in Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition* 57, 452-465, doi: 10.1080/00380768.2011.589363.

- Tang, J., Baldocchi, D.D., 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in a oak–grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry* 73, 183-207.
- Tian, Q., Wang, D., Tang, Y., Li, Y., Wang, M., Liao, C., Liu, F., 2019. Topographic controls on the variability of soil respiration in a humid subtropical forest. *Biogeochemistry* 145, 177-192. doi:10.1007/s10533-019-00598-x.
- Tucker, C.L., Reed, S.C., 2016. Low soil moisture during hot periods drives apparent negative temperature sensitivity of soil respiration in a dryland ecosystem: a multi-model comparison. *Biogeochemistry* 128, 155-169. doi:10.1007/s10533-016-0200-1.
- USDA. United States Department of Agriculture. Disponível em <<  
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref>>> (Acesso em 22 set. 2021).
- Vanhala, P., 2002. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1375-1379.
- Vargas, R., Baldocchi, D.D., Allen, M.F., Bahn, M., Black, T.A., Collins, S.L., Yuste, J. C., Hirano, T., Jassal, R.S., Pumpanen, J., et al., 2010. Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO<sub>2</sub> production and efflux. *Ecological Applications* 20, 1569-1582. doi:10.1890/09-0693.1.
- Vieira, S.R., de Carvalho, J.R.P., González, A.P., 2010. Jack knifing for semivariogram validation. *Bragantia* 69, 97-105. doi:10.1590/s0006-87052010000500011.
- Wang, X., Liu, L., Piao, S., Janssens, I. A., Tang, J., Liu, W., Chi, Y., Wang, J., Xu, S., 2014. Soil respiration under climate warming: differential response of heterotrophic and autotrophic respiration. *Global Change Biology* 20, 3229-3237. doi:10.1111/gcb.12620.
- Xiao, Y., Liu, S., Zhang, M., Chen, B., Xu, Z., Pan, Y., Shi, X., Wu, Z., Luo, T., 2020. Biotic and abiotic properties most closely associated with subtropical forest soil respiration differ in wet and dry seasons: A 10-year in situ study. *Agricultural and Forest Meteorology* 292-293, 108134. doi:10.1016/j.agrformet.2020.108134.
- Xu, M., Shang, H., 2016. Contribution of soil respiration to the global carbon equation. *Journal of Plant Physiology* 203, 16-28.

Yang, X., Fan, J., Jones, S.B., 2018. Effect of Soil Texture on Estimates of Soil-Column Carbon Dioxide Flux Comparing Chamber and Gradient Methods. *Vadose Zone Journal* 17, 1-9. doi:10.2136/vzj2018.05.0112.

Yeomans, J.C., Bremner, J.M., 1988. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19, 1467-1476.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo estudado apresenta elevada pedregosidade limitando ainda mais sua capacidade de estocar carbono e nitrogênio. No entanto, os estoques de COS e NTS encontrados nesta pesquisa são expressivos, superando inclusive aqueles encontrados em Planossolos. Isso reforça a necessidade de manutenção dessas áreas com vegetação, pois sua retirada para diversos fins acarreta emissões de C para atmosfera e contribui para o aquecimento global.

O efeito da topografia não foi considerado, no entanto notou-se sua influência na distribuição do COS e NTS, portanto mais estudos incorporando atributos topográficos são necessários. Sabendo que o alto conteúdo de rochas tende a gerar macroporos e modificar o fluxo de água no perfil do solo, podendo causar transporte vertical de matéria orgânica dissolvida, uma abordagem que envolva avaliar a umidade do solo ao longo de perfil deve ser considerada em um estudo futuro. Isso também é verdadeiro para os compartimentos da matéria orgânica, pois alguns estudos têm evidenciado a influência do conteúdo de rochas na distribuição de suas frações.

Esta pesquisa traz informações importantes sobre a variabilidade espacial, como distâncias de autocorrelação espacial tanto para os estoques de COS e NTS quanto para o efluxo de CO<sub>2</sub> em Neossolos sob vegetação de Caatinga preservada. Isso servirá como base para otimização de amostragens e, conseqüentemente, melhorar as estimativas de estoques de COS, NTS e do o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo. Contudo, ainda que área estudada seja representativa de paisagens semiáridas brasileiras, são informações em escala local e que podem não ser aplicáveis em outros locais. Do mesmo modo, a importância dos fatores controladores pode mudar e os atributos do solo que foram mais importantes neste local de estudo podem não ser em outro. Portanto, novos estudos devem ser realizados buscando identificar os fatores controladores dos estoques de COS, NTS e do efluxo de CO<sub>2</sub> em outras classes de solo sob diferentes coberturas e formas uso da terra.