



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

VANDEMBERG DE ANDRADE LUNA FILHO

**RESPOSTAS DO MICROBIOMA EDÁFICO ÀS VARIAÇÕES SAZONAIS E DE
FERTILIDADE EM SOLOS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

**CAMPINA GRANDE - PB
2023**

VANDEMBERG DE ANDRADE LUNA FILHO

**RESPOSTAS DO MICROBIOMA EDÁFICO ÀS VARIAÇÕES SAZONAIS E DE
FERTILIDADE EM SOLOS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Biologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Ecologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Avany Bezerra Gusmão.

Coorientador: Me. Marllon Rinaldo de Lima Andrade.

**CAMPINA GRANDE - PB
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

L961r Luna Filho, Vandemberg de Andrade.
Respostas do microbioma edáfico às variações sazonais e de fertilidade em solos do Semiárido Paraibano [manuscrito] / Vandemberg de Andrade Luna Filho. - 2024.
27 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2024.

"Orientação : Profa. Dra. Maria Avany Bezerra Gusmão, Coordenação de Curso de Biologia - CCBS. "

"Coorientação: Prof. Me. Marllon Rinaldo de Lima Andrade , Coordenação de Curso de Biologia - CCBS. "

1. Carbono da biomassa microbiana. 2. Respiração edáfica. 3. Quociente metabólico do solo. I. Título

21. ed. CDD 570

VANDEMBERG DE ANDRADE LUNA FILHO

RESPOSTAS DO MICROBIOMA EDÁFICO ÀS VARIAÇÕES SAZONAIS E DE
FERTILIDADE EM SOLOS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO

Trabalho de Conclusão de Curso
(Artigo) apresentado a Coordenação
do Curso de Biologia da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de
licenciado em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Ecologia.

Aprovada em: 12 / 12 / 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dra. Maria Avany Bezerra Gusmão (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Marllon Rinaldo de Lima Andrade (Co-orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Simão Lindoso de Souza
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José João Lelis Leal de Souza
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

À minha querida e amada filha Aurora (*in
memorian*), pelo ensino da resistência,
DEDICO.

“Olhe profundamente a Natureza e então
você entenderá tudo melhor.” Albert Ein-
stein

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1	Área de estudo	9
2.2	Precipitação mensal nas áreas de estudo.....	10
2.3	Delineamento amostral.....	11
2.4	Análises de solos: química e fertilidade.....	11
2.5	Biomassa microbiana do solo.....	12
2.6	Respiração microbiana do solo.....	12
2.1	Quociente metabólico do solo.....	13
2.1	Análises estatísticas.....	13
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4	CONCLUSÃO	18
	REFERÊNCIAS	18
	APÊNDICE A – HISTÓRICO DE PRECIPITAÇÃO	25
	AGRADECIMENTOS	25

RESPOSTAS DO MICROBIOMA EDÁFICO ÀS VARIAÇÕES SAZONAIS E DE FERTILIDADE EM SOLOS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO

RESPONSES OF THE EDAPHIC MICROBIOME TO SEASONAL AND FERTILITY VARIATIONS IN SEMIARID PARAIBA SOILS

Vandemberg de Andrade Luna Filho*
Me. Marllon Rinaldo de Lima Andrade**
Profa. Dra. Maria Avany Bezerra Gusmão**

RESUMO

O microbioma edáfico é o componente mais ativo do solo e controla os ciclos biogeoquímicos terrestres, a exemplo do ciclo do carbono. Todavia, a intensificação da seca em regiões semiáridas impulsionadas por mudanças climáticas e atividades antrópicas, prejudica a capacidade desse microbioma em armazenar carbono e nutrientes nos solos. Assim, objetivamos verificar ao longo de um ano, as respostas edáficas às variações sazonais e de fertilidade do solo, avaliando a biomassa e a atividade microbiana do solo em duas áreas de caatinga no semiárido paraibano. Os dados foram analisados a partir de amostras de solo coletadas no início e final do período seco e chuvoso. Foram feitas análises químicas e de fertilidade do solo e determinação dos parâmetros biológicos (biomassa, respiração e quociente metabólico (qCO_2)). A respiração microbiana variou significativamente entre os períodos de chuva e seca e entre as áreas analisadas ($X^2=5,38$; $gl=1$; $P<0,02$), havendo um aumento significativo na liberação de CO_2 ao final da estação seca. Por sua vez, os totais de biomassa e quociente metabólico do solo mantiveram-se inalterados quando testados para as mesmas variáveis. É possível que o aumento dos pulsos de CO_2 estejam relacionados ao acúmulo e descarte de osmólito e nutrientes pelas células microbianas durante o período seco. Sugerimos ainda que a estabilidade da biomassa e do qCO_2 reflète a adaptação das comunidades microbianas do solo aos ciclos sazonais recorrentes, apoiada pela fertilidade inerente de cada área. Estes dados trazem contribuições interessantes das diferentes respostas edáficas locais à sazonalidade, ampliando as discussões sobre a participação desses ecossistemas sazonalmente secos no funcionamento biogeoquímico global.

Palavras-Chave: carbono da biomassa microbiana; respiração edáfica; quociente metabólico do solo.

ABSTRACT

* Departamento de Biologia, Universidade Estadual da Paraíba, 58429-000, Campina Grande-PB, Brasil. vandemberg.filho@aluno.uepb.edu.br

** Departamento de Biologia e Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Estadual da Paraíba, 58429-000, Campina Grande-PB, Brasil.

The edaphic microbiome is the most active component of the soil and regulates terrestrial biogeochemical cycles, such as the carbon cycle. However, increased drought intensity in semiarid regions, driven by climate change and anthropogenic activities, impairs this microbiome's ability to store carbon and nutrients in soils. Therefore, our aim was to assess soil responses to seasonal variations and soil fertility changes over a year, evaluating soil biomass and microbial activity in two caatinga areas in the semiarid regions of Paraíba. Data were analyzed from soil samples collected at the beginning and end of the dry rainy seasons. Chemical and soil fertility analyses were conducted, along with the determination of biological parameters (biomass, respiration, and metabolic quotient (qCO_2)). The microbial respiration significantly varied between the rainy and dry seasons and among the analyzed areas ($X^2=5.38$; $gl=1$; $P<0.02$), showing a notable increase in CO_2 release at the end of the dry season. Meanwhile, the total soil biomass and metabolic quotient remained unchanged when tested for the same variables. It is possible that the increased CO_2 pulses are related to the accumulation and release of osmolytes and nutrients by microbial cells during the dry period. We also suggest that the stability of biomass and qCO_2 reflects the adaptation of soil microbial communities to recurring seasonal cycles, supported by the inherent fertility of each area. These data provide valuable insights into the distinct local soil responses to seasonality, expanding discussions on the involvement of these seasonally dry ecosystems in global biogeochemical processes.

Keywords: microbial biomass carbon; edaphic respiration; soil metabolic quotient.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais reservatórios de carbono (C) do planeta (Bardgett; Van Der Putten, 2014; Hicks *et al.*, 2019). Sua fração orgânica, predominantemente composta pela matéria orgânica do solo (MOS), desempenha um papel crucial no armazenamento do C no sistema edáfico. A entrada desse elemento no sistema ocorre por meio do aporte de resíduos vegetais, exsudados radiculares e pela transformação desses materiais carbonados pelos macro e microrganismos edáficos (Wang *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2013; Eisenhower *et al.*, 2017).

A atividade conjunta desses microrganismos regula o equilíbrio do CO_2 atmosférico e o ciclo do C na Terra (Barrios, 2007). Este ciclo envolve a fixação do carbono na forma de CO_2 e sua regeneração em compostos orgânicos. Na fase de fixação, organismos fotossintéticos, como as plantas, algas e bactérias autotróficas convertem o CO_2 em complexos hidrocarbonados como o amido, celulose e proteínas (Schimel; Balser; Wallenstein, 2007), sendo esses polímeros responsáveis por sustentar a biomassa e imobilizar temporariamente o carbono na MOS.

Na fase de regeneração ocorre a decomposição de substâncias carbonadas sob a influência do microbioma edáfico, uma associação complexa de microrganismos a exemplo das bactérias e fungos (Berg *et al.*, 2022). Este microbioma representa a fração biologicamente ativa da MOS, excluindo-se raízes das plantas e organismos maiores que $5 \cdot 10^3 \mu m^3$ (Conceição *et al.*, 2005). Os organismos maiores podem ser classificados em meso ($100 \mu m > 2 mm$) e macrofauna edáfica ($< 2 mm$) os quais em conjunto facilitam o processo de decomposição do material orgânico (Barrios, 2007). Durante a decomposição, os microrganismos mineralizam compos-

tos orgânicos complexos da MOS convertendo-os em formas orgânicas mais simples. Dessa forma, em última análise, os teores de C no solo dependem do aporte e do processo de decomposição e/ou mineralização da MOS, cujo produto final é o CO₂.

Como o CO₂ é o resultado do metabolismo energético das células microbianas, a quantidade e velocidade de sua liberação para a atmosfera indica a atividade biológica do solo (Franzluebbers, 2016). As comunidades microbianas estabelecidas no sistema edáfico são sensíveis às alterações nas condições ambientais em escalas locais como pH, estoques de MOS, umidade e temperatura do solo, que podem influenciar negativamente a diversidade, crescimento e biomassa do microbioma edáfico (Souto *et al.*, 2008; Butler *et al.*, 2012; Manzoni; Schimel; Porporato, 2012; Camelo *et al.*, 2021; Luna *et al.*, 2021; De Oliveira *et al.*, 2022). Essas alterações ainda podem impactar a dinâmica dos ciclos biogeoquímicos do C na interface solo-atmosfera, afetando a emissão de gases de efeito estufa e a relação carbono-clima (Huang *et al.*, 2016).

Com o advento da revolução industrial, significativas concentrações do CO₂ têm sido verificadas na atmosfera terrestre (Song; Seo; Lee, 2023; Zhang *et al.*, 2022). Em países em desenvolvimento, como o Brasil, mudanças no uso da terra, como a conversão da vegetação nativa em cultivos intensivos, queimadas e manejo intensivo do solo, têm causado rápidas perdas da MOS e contribuído para a vulnerabilidade climática desse ecossistema. Predominante na região nordeste do Brasil, a caatinga configura-se como um ecossistema natural altamente ameaçado, abrigo de cerca de 27 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Sua atual extensão territorial consiste em paisagens fragmentadas de campos agrícolas e manchas de florestas secundárias com distintos estágios de sucessão (De Albuquerque *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2012; Schilling *et al.*, 2016).

A caatinga se destaca pela variabilidade espacial na precipitação, comum em ambientes sujeitos a marcada sazonalidade (Brasil Neto *et al.*, 2021). Nesses ambientes ocorre uma divisão clara de duas estações bem definidas, sendo uma seca que dura entre 7 e 9 meses e uma chuvosa que varia entre 3 e 5 meses. Esta sazonalidade influencia as propriedades físico-químicas do solo e a fisiologia das comunidades microbianas estabelecidas no sistema edáfico desses ambientes (Maestre *et al.*, 2015; Salgado *et al.*, 2015). Os solos da caatinga também apresentam diferentes condições de fertilidade associadas principalmente à sua própria biogênese, com solos cristalinos originados da rocha matriz (De Souza *et al.*, 2022).

A dinâmica da fertilidade do solo está intimamente ligada às condições predominantes em uma determinada região (Oliveira *et al.*, 2005). De acordo com Husein *et al.*, (2021), a fertilidade edáfica é um conceito abrangente e complexo, estreitamente relacionado à capacidade inerente dos solos em fornecer nutrientes essenciais às plantas. Essa capacidade é resultado de uma complexa interação de processos biológicos, químicos e físicos, que promovem a constante ciclagem de nutrientes entre as suas formas orgânicas e inorgânicas (Black, 1993). Além de fornecer os nutrientes essenciais, a fertilidade do solo também está relacionada a sua capacidade de disponibilizar quantidades adequadas de água no solo. Assim, esse conceito emerge como um elemento crucial da produtividade do solo, juntamente com fatores como profundidade, paisagem e clima, que também desempenham papéis limitantes nesse contexto (Husein *et al.*, 2021).

Os microrganismos exibem diferentes respostas adaptativas, indicando tolerância ou sensibilidade à esses elementos que compõem a produtividade do solo. Diferentes estudos têm apontado os efeitos da seca prolongada sobre a diminuição

da atividade e biomassa microbiana do solo (Lacerda-Júnior *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2021), enfatizando a perturbação desses ambientes ditos naturais e o reflexo na comunidade microbiana do solo (Pajares *et al.*, 2016). Kavamura *et al.* (2013) observaram que uma das respostas microbianas à influência da sazonalidade é a alternância dos grupos funcionais no solo, resultando na predominância de fungos durante a seca e de bactérias durante os períodos chuvosos. Essa alternância de grupos influencia as dinâmicas de decomposição da MOS o que pode impulsionar a atividade biológica e sustentar a biomassa microbiana ao longo do ano (Baldrian, 2017). No entanto, a exposição repetitiva aos ciclos sazonais, junto a mudanças em sua duração, como secas prolongadas e chuvas intensas, pode resultar em diferentes níveis de estresse ambiental para as comunidades microbianas.

Uma abordagem comum para mensurar os níveis de estresse causado pela sazonalidade no solo é a análise do quociente metabólico (qCO_2), que relaciona a biomassa microbiana e a quantidade de CO_2 liberada (Anderson; Domsch, 1993). A avaliação aprofundada desses atributos biológicos oferece *insights* sobre o estado metabólico das comunidades microbianas sob diferentes condições edáficas, proporcionando respostas detalhadas das modificações causadas pela sazonalidade em ambientes semiáridos.

Assim, dada a variação sazonal e espacial na Caatinga, nosso objetivo foi avaliar a influência da sazonalidade no quociente metabólico do solo através da biomassa e respiração microbiana em solos de diferentes condições de fertilidade no semiárido paraibano. Testamos a hipótese de que mesmo com a redução hídrica na estação seca, solos com maior fertilidade edáfica mantêm o qCO_2 estável (ou inalterado).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

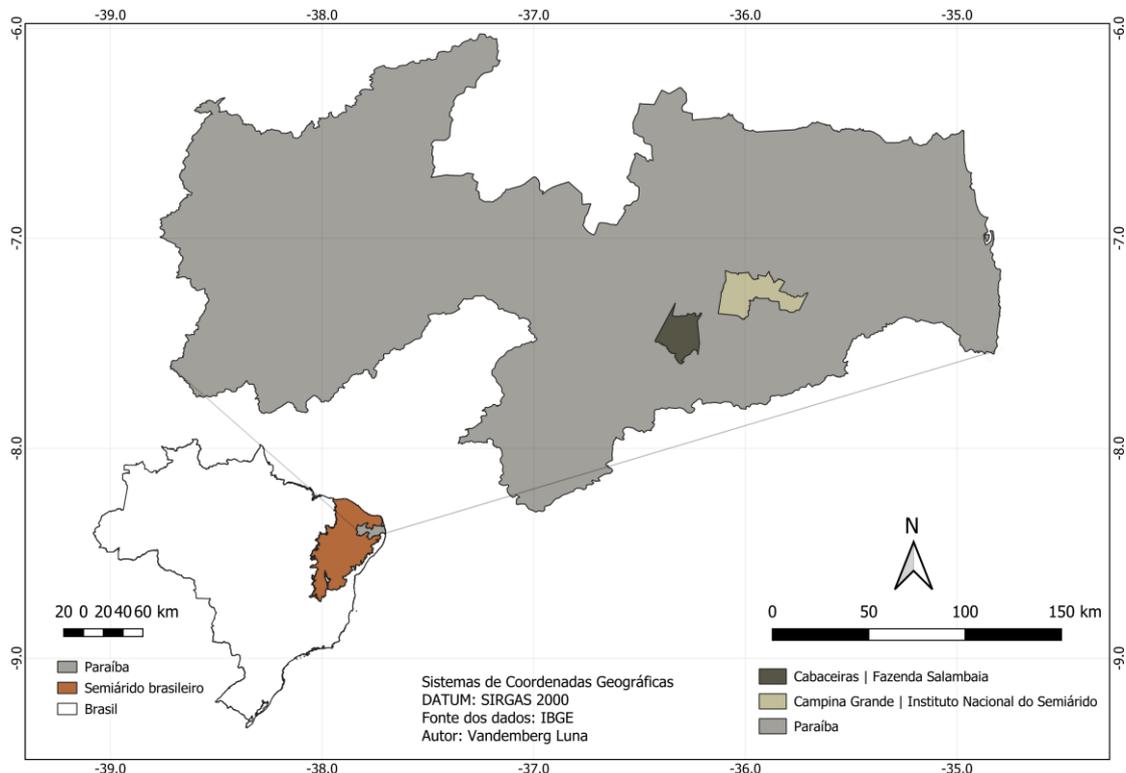
Amostras de solo foram coletadas em duas áreas, 1^o. na Estação Experimental Prof. Ignácio Salcedo, pertencente ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizada no município de Campina Grande, e 2^o. na Fazenda Salambaia, localizada entre os municípios de Boa Vista e Cabaceiras (Figura 1).

O INSA (7°16'S/35°16'W) tem uma área de 675 hectares, apresenta altitude de 480 metros, precipitação média de 800 mm/ano e temperaturas entre 19,8 °C e 28,7 °C. O clima predominante na região correspondente ao Planalto da Borborema em que o INSA está inserido é o semiárido quente, classificado por Köppen-Geiger como BSh (Alvares *et al.*, 2013). Os solos predominantes na região do agreste da Borborema onde a estação experimental está localizada são classificados como Neossolos litólicos e Neossolos regolíticos (Costa, 2019). Essas classes de solo são caracterizadas por apresentar pouca evolução, constituído principalmente por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura. Além dos Neossolos, no INSA encontram-se inclusões de Planossolos, classe caracterizada por agrupamento de solos minerais com horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E (Santos *et al.*, 2018).

A Fazenda Salambaia (7°21'S/35°16'W) tem uma área com 1.112 hectares, apresenta altitude de 487 metros (Lunguinho *et al.*, 2015), precipitação média de 316 mm/ano e temperaturas entre 25°C e 27°C. O clima correspondente ao Cariri Paraibano onde o sítio de pesquisa está inserido é também o semiárido quente, classifi-

cado por Köppen-Geiger como BSh (Alvares *et al.*, 2013). As classes de solos predominantes na Fazenda Salambaia, similarmente ao INSA, apresentam classes de Neossolos regolíticos. Além dessa classe, também é possível encontrar Luvisolos crômicos, solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases altas logo abaixo dos horizontes A ou E (Lunguinho *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2018). Nessa região, torna-se bastante comum a ocorrência de extensas áreas com afloramentos rochosos, conhecidos popularmente como “lajedos”, importantes para movimentar a economia e turismo local, além de ser considerado como refúgio para uma diversidade de espécies da fauna e flora endêmica da caatinga (Lunguinho *et al.*, 2015).

Figura 1. Mapa do Estado da Paraíba, destacando os municípios em que foram estabelecidos os sítios experimentais: Fazenda Salambaia (Cabaceiras) e Instituto Nacional do Semiárido (Campina Grande).

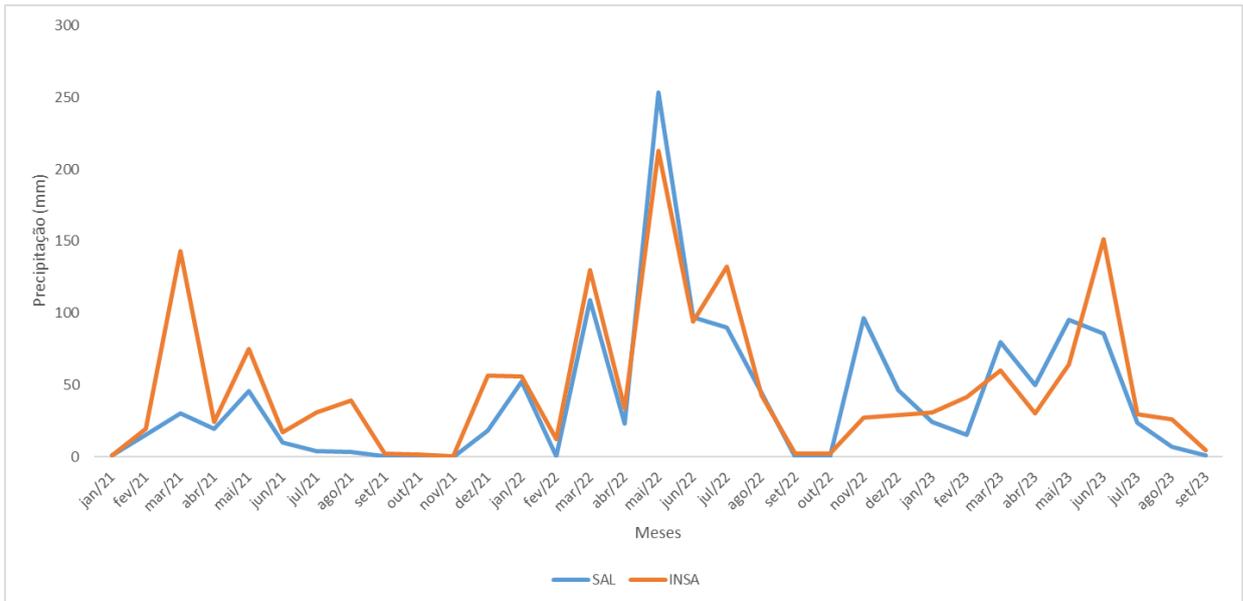


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.2 Precipitação mensal nas áreas de estudo

A precipitação mensal durante o período da amostragem do solo foi coletada através dos dados meteorológicos disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão da Água do Estado da Paraíba (AESAPB), entre os períodos de janeiro de 2021 e setembro de 2023 (Figura 3). Os dados foram utilizados para verificar a variabilidade da chuva nos locais de estudo durante o período de coleta dos solos (Figura 2).

Figura 2. Precipitação mensal entre os anos de 2021 e 2023 na Fazenda Salambaia (SAL) e no Instituto Nacional do Semiárido (INSA), áreas de Caatinga. Dados disponibilizados pela AESAPB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

2.3 Delineamento Amostral

As amostras de solo foram coletadas no início e final das estações seca e chuvosa entre 2021 e 2022, totalizando quatro coletas. Essa escolha objetivou analisar a influência de todo o período sazonal nos parâmetros biológicos do solo avaliados neste estudo. Em cada área, as amostras de solo foram coletadas em três pontos, a 10 cm de profundidade e distantes 10 m. As amostras foram usadas para a determinação da biomassa e da atividade respirométrica das comunidades microbianas do solo. O material foi tamisado em peneira de 2 mm e armazenado a 4 °C até a realização das análises. Subamostras de solo foram utilizadas para a determinação da capacidade de retenção de água e umidade do solo (CRA), as quais serviram de parâmetro para que fossem ajustadas à 60% (Monteiro; Frighetto, 2000). Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Biotecnologia de Solo e Água, CCA, UFPB-Areia sob supervisão do Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza.

2.4 Análise de solo: química e fertilidade

Para a análise química da fertilidade do solo, subamostras dos solos de cada sítio amostral foram separadas e homogeneizadas para obter-se uma amostra composta. Após homogeneizadas, as amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm para a separação do cascalho da terra fina. O pH do solo foi determinado em água (1:2,5). A acidez potencial (H + Al) foi determinada por extração com acetato de cálcio 0,5 M ajustado para pH 7,0. O conteúdo de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} foi extraído por KCl 1 mol L⁻¹ e medido por um espectrômetro de absorção atômica. Os teores de P, K e Na foram extraídos por meio de solução extratora de Mellich-1. A partir desses resultados, a capacidade total de troca catiônica (CTC = Ca^{++2+} + Mg^{2+} + K + Na + (H + Al)) e saturação por base (V% = Ca^{++2+} + Mg^{2+} + K + Na/CTC) foram calculados (EMBRAPA, 2017). O teor de matéria orgânica (MO) foi quantificado por via úmida ($K_2Cr_2O_7$) de acordo com o método de Walkley-Black. Na tabela 1 são descritos os valores dos atributos químicos das amostras de solo coletadas em ambos os sítios de estudo.

Tabela 1. Análise de Química e Fertilidade de amostras de solo na camada de 0-10 cm, coletadas na Fazenda Salambaia (SAL) e no Instituto Nacional do Semiárido (INSA).

Local	pH	P	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	MO
	H ₂ O (1:2,5)	----mg/dm ³ ---			-----cmol _c /dm ³ -----						g/kg
INSA	4,5	3,88	113,37	0,06	7,49	0,15	2,83	0,84	4,02	11,51	22,51
SAL	6,4	11,56	268,65	0,10	0,44	0,07	5,80	2,11	8,71	9,95	48,92

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Nota:

P, K, Na: Extrator Mehlich 1

H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 M, pH 7,0

Al, Ca, Mg: Extrator KCl 1 M

SB: Soma de Bases Trocáveis

CTC: Capacidade de Troca Catiônica

M.O.: Matéria Orgânica – Walkley-Black

2.5 Biomassa microbiana do solo

A determinação do carbono da biomassa microbiana (BMS-C) foi realizada pelo método de fumigação-extração adaptado de Vance *et al.* (1987) e Tate *et al.* (1988). O carbono foi extraído a partir de amostras não fumigadas e amostras fumigadas com uso de clorofórmio (CHCl₃ isento de etanol) no solo por 24h. Para a extração do carbono lábil das subamostras fumigadas e não fumigadas, foram usados 50 mL de K₂SO₄ 0,5 M em agitador por 30 minutos. O cálculo do BMS-C se dá pela diferença da concentração de C nas amostras fumigadas e não fumigadas, e o resultado é dividido pelo fator de correção, cujos valores são aplicados na seguinte equação (Sparling; West, 1988):

$$\text{BMS-C (mg C microbiano Kg}^{-1} \text{ solo)} = \text{FC} \times \text{Kc}^{-1}$$

Onde: BMS-C = Carbono da Biomassa Microbiana do Solo;

FC = Fluxo obtido da diferença entre a quantidade de C (mg kg⁻¹) recuperada do extrato da amostra fumigada e não fumigada;

Kc = Fator de correção (=0,33).

2.6 Respiração microbiana do solo

A atividade global do microbioma edáfico foi avaliada a partir do método em sistema estático fechado para captura de CO₂ (Alef, 1995), através da taxa de C-CO₂. Foram pesadas 100 g de solo de cada um dos pontos coletados nas duas áreas (P1, P2 e P3). Posteriormente, o solo foi acondicionado em potes de vidro de 3 L hermeticamente fechados, de modo a evitar captura de CO₂ externo e vazamento de C_{mic}. Para a captura do CO₂ liberado, foram usados 25 mL de NaOH 0,5 M, permanecendo incubados por um total de 192 h. Ao final do período de incubação, as amostras foram padronizadas, adicionando-se BaCl₂ e fenolftalína. Por fim, a quantidade de CO₂ foi titulada com HCl 0,5 M, seguidos da prova em branco (sem o solo). O C-CO₂ liberado pelos microrganismos foi calculado pela equação:

$$\text{RBS} = (\text{BR} - \text{L}) \times \text{M} \times 6 \times (1000/\text{MSS}) \times (\text{V}_1/\text{V}_2)$$

Onde: RBS = Respiração Basal do Solo (mg kg^{-1})

BR = Leitura do branco (mL)

L = Leitura da amostra titulada (mL)

M = Molaridade do HCl (Mol L^{-1})

6 = Massa atômica do C dividido pelo número de mols de CO_2 reagido com o NaOH

1000 = Conversão do resultado para kg de solo

MSS = Massa de solo seco (g)

V_1 = Volume de NaOH utilizado na captura do CO_2 (mL)

V_2 = Volume de NaOH utilizado na titulação (mL).

2.7 Quociente metabólico do solo

Após as análises do C- CO_2 e do BMS-C, determinou-se o quociente metabólico através da equação: $q\text{CO}_2 = \text{C-CO}_2/\text{BMS-C}$ (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

2.8 Análises estatísticas

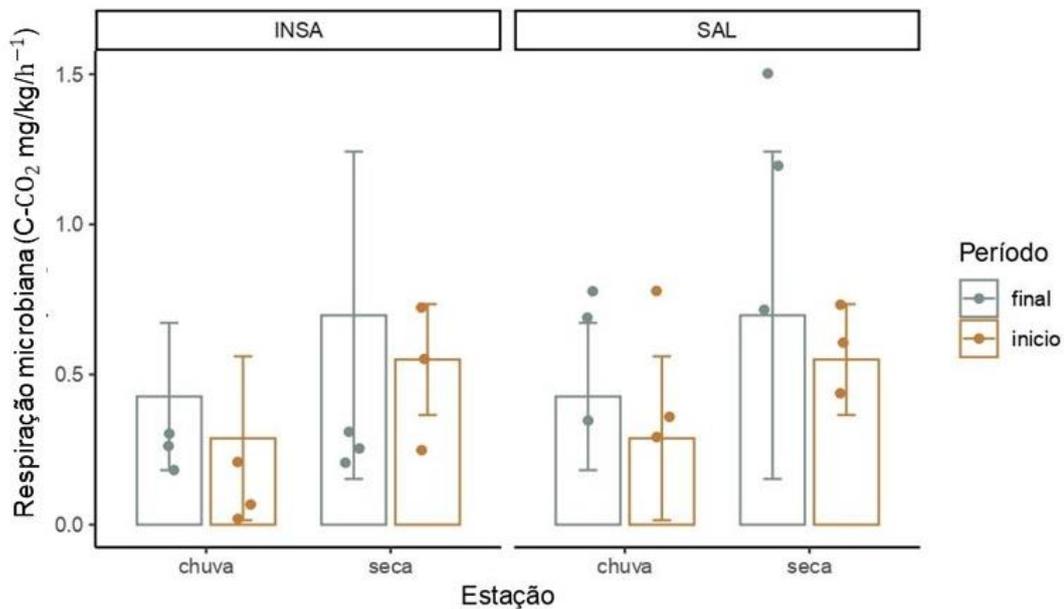
Modelos generalizados lineares (GLM) foram construídos para verificar o nível de significância para as variáveis contínuas respiração, biomassa e $q\text{CO}_2$ em função da interação entre as variáveis período, estação e local. Para isto, os modelos para família gaussiana foram testados através de análise de desvio ANODEV. As variáveis biomassa e $q\text{CO}_2$ foram inseridas com transformação logarítmica base 10 no GLM. Todas as análises foram realizadas no software R, versão 4.0.4.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A quantidade de CO_2 proveniente da respiração microbiana variou significativamente entre as estações e períodos sazonais, assim como nos diferentes locais avaliados ($X^2=5,38$; $gl=1$; $P<0.05$). Notou-se um aumento na emissão de CO_2 microbiano ao final da estação seca, seguido por uma diminuição no início da estação chuvosa (Figura 4). No entanto, não foram observadas diferenças significativas nos valores totais do BMS-C ($X^2=0,34$; $gl=1$; $P>0.05$) nem no $q\text{CO}_2$ ($X^2=2,89$; $gl=1$; $P>0.05$) ao serem testados para as mesmas variáveis.

A respiração microbiana no solo é influenciada por fatores abióticos como temperatura e umidade, e bióticos a exemplo da vegetação local que regula a disponibilidade do substrato acima do solo (Butler *et al.*, 2012; Pajares *et al.*, 2018; Pugnaire *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021). Os fluxos de emissão de carbono resultantes da atividade microbiana observados neste estudo parecem estar associados à variação sazonal da umidade no solo nos locais investigados (Camelo *et al.*, 2021; Schwinning; Sala, 2004). Esses teores de umidade no solo não apenas impactam a atividade microbiana e a decomposição da serapilheira (Pugnaire *et al.*, 2019), mas também influencia na propagação das trocas gasosas no interior do sistema edáfico (Vargas-Terminel *et al.*, 2022).

Figura 3. Respiração microbiana em função do local (INSA e Fazenda Salambaia) e do período sazonal (início e final da seca e chuva).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Isso ocorre porque a disponibilidade de água no solo aumenta a atividade microbiana na Caatinga (Martins *et al.*, 2010), influenciando a respiração do solo. A maior porosidade de solos preservados também permite trocas gasosas mais eficientes entre o solo e a atmosfera, favorecendo a atividade biológica no solo. Estudos como o de Alves *et al.*, (2006), Oliveira e Soares (2016) e Lourenço *et al.*, (2022) em ambientes semiáridos também revelam comportamentos semelhantes do fluxo sazonal das emissões CO₂ no solo, indicando que esse padrão pode ser extrapolado para outras regiões da Caatinga.

Os dados pluviométricos destacaram variações sazonais significativas nas áreas estudadas (Figura 2). De setembro a dezembro houve uma diminuição acentuada da precipitação, contrastando com significativo aumento de março a julho. No entanto, ao comparar o histórico de precipitação dos últimos 10 anos nessas áreas (material suplementar 1), percebemos quantidades anormais de chuva em 2022. Esse aumento sutil na precipitação tem sido associado à ocorrência do fenômeno La Niña iniciado em 2020 e finalizado em 2023 (INMET, 2023; Medeiros *et al.*, 2020). Esses dados são relevantes para se discutir pois o aumento da precipitação também se apresenta como um fator limitante à atividade microbiana, visto que uma intensa infiltração de água no solo satura os colóides estruturais e afeta negativamente o metabolismo e a expressão gênica das células microbianas alterando sua composição (Liu *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2015).

As maiores emissões de CO₂ microbiano foram observadas na Fazenda Sallambaia (~1,13 mg/kg/h) ao final da estação seca, seguidas por uma rápida diminuição no início da estação chuvosa (~0,47 mg/kg/h). O mesmo foi observado nos solos do INSA, porém em uma menor escala (~0,25 mg/kg/h no final da seca e ~0,09 mg/kg/h no início da estação chuvosa). Esse aumento na respiração microbiana em ambos os sítios avaliados pode estar associado a uma resposta fisiológica ao descarte de osmólitos e nutrientes com a entrada de água no solo dada a transição entre o período seco para o chuvoso (Birch, 1958; Calvo-Rodriguez; Kiese; Sánchez-Azofeifa, 2020; Schimel; Balsler; Wallenstein, 2007; Waring; Poderes, 2016).

Durante o período seco, os substratos se tornam limitados acima do solo o que leva o microbioma edáfico a enfrentar um estresse fisiológico devido a escassez dos recursos (Schimel; Balser; Wallenstein, 2007). Esse cenário de estresse hídrico tende a influenciar a distribuição de nutrientes pelas comunidades microbianas (Nielsen; Ball, 2015; Zhao *et al.*, 2016) e levar ao acúmulo de solutos em suas células a fim de evitar a desidratação e a mortalidade (Pavinato; Merlin; Rosolem, 2009; Moyano; Manzoni; Chenu, 2013). Entretanto, esse acúmulo de osmólitos representa um alto custo energético para as células microbianas, o que pode impactar a incorporação do C em sua biomassa e o crescimento dessas comunidades no solo.

Assim, com a rápida entrada de água no sistema, as células microbianas necessitam eliminar os osmólitos acumulados, seja por polimerização ou por meio do processo de respiração heterotrófica. Quando considerada em uma escala ecossistêmica, essa condição resulta em um aumento no fluxo de gases para a atmosfera (Schimel; Balser; Wallenstein, 2007; Waring; Poderes, 2016). No entanto, essa justificativa precisa ser considerada de forma mais criteriosa sob duas principais perspectivas: 1) a liberação de CO₂ com base em conceitos puramente bioquímicos, como um subproduto do metabolismo microbiano e, 2) em uma escala mais ampla, a partir dos balanços líquidos do CO₂ no sistema edáfico sob influência dos fatores abióticos locais.

Ao analisar a fertilidade edáfica dos locais avaliados, observamos que o pH do solo da Fazenda Salambaia foi relativamente mais alto (6,4) em comparação com o pH registrado no INSA (4,5). Além disso, notamos que não houveram deficiências de fósforos (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K⁺), micronutrientes, saturação por bases e CTC em ambos os sítios experimentais. Os níveis de P e K⁺ são semelhantes aos observados por Corrêa *et al.* (2009), Fraga (2009) e Costa (2019) em solos arenosos do semiárido. Também não foram identificados problemas de toxicidade por alumínio ou altos teores de sódio nas áreas. Esses dados indicam que tanto a Fazenda Salambaia quanto o INSA apresentam solos com avançado estado de preservação (Sousa; Lobato, 2004; Tomé Jr, 1997). Sendo um ambiente propício ao crescimento e diversidade vegetal acima do solo (Freire; Freire, 2007).

A Fazenda Salambaia, por outro lado, registrou os maiores teores de MO, 48,91 g/kg, contrastando com os 22,51 g/kg do INSA. Esses níveis MOS são marcadores da saúde e atividade biológica do solo, pois a atividade microbiana está intrinsecamente ligada à decomposição e mineralização de seus compostos, fornecendo nutrientes essenciais para a estruturação do solo (Moreira; Siqueira, 2006). Essa variação e baixos teores de MO também foram vistas em outras áreas de Caatinga no semiárido brasileiro (Camargo e Ceretta 2000; Santos *et al.*, 2012; Costa, 2019).

A presença de um afloramento rochoso (AR) composto principalmente por Neossolo Regolítico na Fazenda Salambaia pode ser um fator que melhora a fertilidade e a atividade microbiana nesse sítio. De acordo com Lunghino *et al.* (2015), a inclinação do terreno favorece o acúmulo de minerais e umidade nos solos ao redor do lajedo, aumentando o potencial de aproveitamento desses recursos no solo pelas comunidades vegetais presentes.

Esse potencial hídrico também promove uma maior diversidade florística (Lunghino *et al.*, 2015) e exerce influência positiva na qualidade da serapilheira nesta área. Não investigamos a influência direta desses fatores ambientais sobre a deposição mineral e na atividade microbiana. No entanto, sugerimos que a incorporação de resíduos orgânicos provenientes do aporte de serapilheira menos recalcitrante somado às condições de fertilidade local (*e.g* pH e MOS) contribui positivamente para as maiores emissões de CO₂ microbiano e também para o incremento

do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) na Fazenda Salambaia (Kuzakov, 2006; Pugnaire *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2017).

Os teores totais do BMS-C não foram significativamente afetados pelo período sazonal ou pelas áreas estudadas. Esse padrão sugere um estado de equilíbrio ambiental alcançado por essas áreas preservadas. Todavia, a Fazenda Salambaia apresentou valores do BMS-C mais elevados (234,12 mg/kg⁻¹ solo) do que o INSA (78,51 mg/kg⁻¹ solo) (Tabela 2). Acreditamos que o aumento do BMS-C na Fazenda Salambaia se deve à maior disponibilidade de MO (48,91 g/kg) e nutrientes em comparação ao INSA (22,51 g/kg) (Camelo *et al.*, 2021; Luna *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2017).

Tabela 2. Média da Biomassa microbiana do solo na camada de 0-10 cm, observada na Fazenda Salambaia (SAL) e no Instituto Nacional do Semiárido (INSA).

Local	Estação	Período	BMS-C (mg/kg ⁻¹ solo)
INSA	Seca	Início	76,48
		Final	95,88
	Chuva	Início	66,20
		Final	75,49
SAL	Seca	Início	263,64
		Final	280,95
	Chuva	Início	206,04
		Final	185,85

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Recorrentemente os teores do BMS-C têm sido utilizados como sensível indicador das alterações ambientais nos compartimentos orgânicos do solo (Anderson; Domsch, 1993; Franzluebbers, 2016; Trivedi; Anderson; Singh, 2013; Wan *et al.*, 2021). Visto que grande parte do C está contido na biomassa microbiana abaixo do solo (Baldrian, 2017; Trivedi; Anderson; Singh, 2013). As comunidades microbianas regularmente são expostas às mudanças sazonais e espaciais dos ambientes semi-áridos (Andrew *et al.*, 2012; Bernard; Osborne; Firestone, 2013). No entanto, a resistência microbiana e a sua recuperação aos ciclos sazonais repetitivos dependem dos parâmetros físico-químicos, a exemplo dos teores de nutrientes que compõem a fertilidade edáfica (Bünemann *et al.*, 2018; Luna *et al.*, 2021), além dos parâmetros biológicos, como a própria composição vegetal acima do solo que influencia na qua-

lidade e quantidade da serapilheira formada ao longo das estações (Gillespie *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2012).

Áreas de caatinga com histórico de preservação parecem conferir maior equilíbrio às propriedades biológicas do solo (Martins *et al.*, 2010), que por sua vez permite que o microbioma gradativamente se adapte às mudanças ambientais desencadeadas ao longo dos períodos sazonais. Nossos achados corroboram essa hipótese, sugerindo que as características intrínsecas da fertilidade edáfica de cada local estejam exercendo maior pressão do que a própria sazonalidade no BMS-C (Süneman *et al.*, 2021).

No entanto, avaliar isoladamente as alterações na biomassa e na atividade microbiana pode não fornecer detalhamentos do estado metabólico dessas populações no solo (Franzluebbers, 2016). As altas taxas respiratórias podem representar tanto produtividade ecossistêmica como comprometimentos dos processos físico-químicos do solo ao afetar fatores como agregação e capacidade de retenção de água do sistema (Neves *et al.*, 2021; Vargas-Terminel *et al.*, 2022; Wan *et al.*, 2021). Assim, torna-se necessário avaliar o quociente metabólico do solo, um parâmetro que verifica a eficiência da atividade metabólica do microbioma edáfico (Anderson; Domsch, 1993). Uma biomassa microbiana mais eficiente perderia menos C na forma de CO₂ com a respiração e o incorporaria à própria biomassa (Chou *et al.*, 2008).

Vimos que o $q\text{CO}_2$ permaneceu estável sazonalmente e entre as áreas avaliadas, e assim, não corroboramos a hipótese de que solos com menor fertilidade aumentariam o $q\text{CO}_2$ devido ao estresse provocado pela rápida flutuação da umidade sazonal no solo (Camelo *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2010; Montaña *et al.*, 2009). Uma possível explicação para isso pode estar nas diferenças de fertilidade entre os locais, as quais não variaram significativamente a ponto de impactar o $q\text{CO}_2$ em ambas as áreas. Apesar das mudanças na estrutura da vegetação e na serapilheira devido à sazonalidade, a qualidade e a disponibilidade de nutrientes na MOS parecem minimizar o estresse metabólico dos microrganismos no sistema edáfico (Gillespie *et al.*, 2020). Isso se deve principalmente ao fato desses solos apresentarem boas quantidades de carbono orgânico total (COT), menor compactação e maior cobertura vegetal (Bronick; Lal, 2005; Montaña *et al.*, 2009). Esses indicadores aumentam a proteção física dos agregados do solo e permitem uma maior difusão de oxigênio no interior do sistema edáfico (Lourenço *et al.*, 2022).

Apesar disso, as limitações da sazonalidade e da fertilidade edáfica na biomassa e atividade microbiana do solo são evidentes, principalmente quando consideramos a influência das mudanças climáticas na região semiárida (Dai, 2013; IPCC, 2021; Wan *et al.*, 2021). Estudos indicam uma desconexão entre a atividade microbiana e a qualidade do substrato acima do solo (Conti *et al.*, 2016), sugerindo que os fatores genéticos e moleculares dos grupos funcionais das camadas mais profundas também estejam impactando os parâmetros físico-químicos e biológicos do solo (Lacerda-Junior *et al.*, 2019; Nottingham *et al.*, 2022; De Oliveira *et al.*, 2022), e a consequente manutenção dos ciclos biogeoquímicos dessas áreas sazonalmente secas.

Indicamos que estudos semelhantes já estão em andamento nessas áreas avaliadas ao longo da bacia do Rio Paraíba. Essas pesquisas investigam a influência da redução hídrica, resultado das mudanças climáticas, nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Elas se concentram principalmente no comportamento da biomassa e na respiração microbiana, examinando como esses fatores afetam os serviços ecossistêmicos fornecidos por esses ambientes.

4 CONCLUSÃO

A respiração microbiana do solo é sensível à disponibilidade de água no solo, sendo influenciada pelo ciclo sazonal e pelas características de fertilidade edáfica específicas de cada local. Observamos um notável aumento na emissão de CO₂ no final do período seco, seguido por uma diminuição durante a transição para o período chuvoso. No entanto, os valores totais de biomassa e $q\text{CO}_2$ permaneceram inalterados, sugerindo baixo estresse metabólico no microbioma edáfico das áreas estudadas. É importante ressaltar que este estudo fornece valores de referência para o estado de equilíbrio ambiental em áreas preservadas do semiárido paraibano.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G.; Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22, 711-728, 2013.
- ALVES, A. R., SOUTO, J. S., dos SANTOS, R. V., & CAMPOS, M. C. Decomposição de resíduos vegetais de espécies da Caatinga, na região de Patos, PB. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 57-63, 2006.
- ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.25, n.3, p.393-395, 1993.
- ANDREW, D.R.; FITAK, R.R.; MUNGUIA-VEGA, A.; RACOLTA, A.; MARTINSON, V. G.; DONTSOVA, K. Abiotic Factors Shape Microbial Diversity in Sonoran Desert Soils. **Applied and Environmental Microbiology**, v.78, n.21, p.7527–7537, 2012.
- BALDRIAN, P. Microbial activity and the dynamics of ecosystem processes in forest soils. **Current opinion in microbiology**, v. 37, p. 128-134, 2017.
- BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505-511, 2014.
- BARNARD, R.; OSBORNE, C.; FIRESTONE, M. Responses of soil bacterial and fungal communities to extreme desiccation and rewetting. **ISME J** 7, 2229–2241, 2013.
- BARRIOS, E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. **Ecological economics**, v. 64, n. 2, p. 269-285, 2007.
- BERG, G.; RYBAKOVA, D.; FISCHER, D.; CERNAVA, T.; VERGÈS, M. C. C.; CHARLES, T.; ... & SCHLOTTER, M. Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. **Microbiome**, v. 8, n. 1, p. 1-22, 2020.
- BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. **Plant and soil**, v. 10, p. 9-31, 1958.

BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. D. C.; DA SILVA, R. M.; DOS SANTOS, C. A. C.; & MISHRA, M. Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1097, 2021.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z., CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; ... & BRUSSAARD, L. Soil quality—A critical review. **Soil biology and biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

BUTLER, A.; MEIR, P.; SAIZ, G.; MARACAHIPES, L.; MARIMON, B. S.; & GRACE, J. Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. **Plant and soil**, v. 352, p. 129-142, 2012.

CALVO-RODRIGUEZ, S.; KIESE, R.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Seasonality and budgets of soil greenhouse gas emissions from a tropical dry forest successional gradient in Costa Rica. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 125, n. 9, p. e2020JG005647, 2020.

CAMARGO, F.A.O.; CERETTA, C.A. Composição da fase sólida orgânica do solo. **Fundamentos de química do solo**, v. 5, p. 61-86, 2000.

CAMELO, D.; DUBEUX JR, J. C. B.; DOS SANTOS, M. V. F.; LIRA JR, M. A.; FRACETTO, G. G. M.; FRACETTO, F. J. C.; ... & DE FREITAS, E. V. Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1558, 2021.

CHEN, T.; XU, Z.; TANG, G.; CHEN, X.; FANG, H.; GUO, H.; ... & NIU, X. Spatiotemporal monitoring of soil CO₂ efflux in a subtropical forest during the dry season based on field observations and remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3481, 2021.

CHOU, W. W.; SILVER, W. L.; JACKSON, R. D.; THOMPSON, A. W.; & ALLEN-DIAZ, B. A. R. B. A. R. A. The sensitivity of annual grassland carbon cycling to the quantity and timing of rainfall. **Global Change Biology**, v. 14, n. 6, p. 1382-1394, 2008.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 29, p. 777-788, 2005.

CONTI, G.; KOWALJOW, E.; BAPTIST, F.; RUMPEL, C.; CUCHIETTI, A.; PÉREZ HARGUINDEGUY, N.; DÍAZ, S. Altered soil carbon dynamics under different land-use regimes in subtropical seasonally-dry forests of central Argentina. **Plant and Soil**, v. 403, p. 375-387, 2016.

CORRÊA, R.M.; FREIRE, M.B.G. dos S.; FERREIRA, R.L.C.; FREIRE, F.J.; PESSOA, L.G.M.; MIRANDA, M.A.; MELO, D.V.M. Atributos químicos de solos sob dife-

rentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.33 n.2, p.305-314, 2009

COSTA, C.R.G. Dinâmica temporal do efluxo de CO₂ e produção de glomalina em área de caatinga sob neossolo litólico. **Dissertação**. UFPB. 2019.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nat. Clim. Change** **3**, 52–58 (2013).

DE ALBUQUERQUE, U. P.; DE LIMA ARAÚJO, E.; EL-DEIR, A. C. A.; DE LIMA, A. L. A.; SOUTO, A.; BEZERRA, B. M. Caatinga revisited: ecology and conservation of an important seasonal dry forest. **Sci. World J.**, 1–18. 2012.

DE OLIVEIRA, M. L.; DOS SANTOS, C. A.; DE OLIVEIRA, G.; PEREZ-MARIN, A. M.; SANTOS, C. A. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. **Science of the Total Environment**, v. 792, p. 148458, 2021.

DE SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004., 2004.

DIONISIO, J.; PIMENTEL, I.; SIGNOR, D. Respiração microbiana. In: **Guia prático de biologia do solo**. Embrapa Semiárido, Petrolina, 2016.

EISENHAUER, N.; LANOUE, A.; STRECKER, T.; SCHEU, S.; STEINAUER, K.; THAKUR, M. P.; MOMMER, L. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 44641, 2017.

FRAGA, I.F.; GENRO JUNIOR, S.A.; INDA, A.V.; ANGHINONI, I. Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 497 – 506, 2009.

FRANZLUEBBERS, A. J. Should soil testing services measure soil biological activity?. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 1, n. 1, p. 150009, 2016.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. **Fertilidade do solo**, v. 1, p. 929-954, 2007.

GILLESPIE, L. M.; FROMIN, N.; MILCU, A.; BUATOIS, B.; PONTOIZEAU, C.; HÄT-TENSCHWILER, S. Higher tree diversity increases soil microbial resistance to drought. **Communications biology**, v. 3, n. 1, p. 377, 2020.

HICKS, L. C.; MEIR, P.; NOTTINGHAM, A. T.; REAY, D. S.; STOTT, A. W.; SALINAS, N.; WHITAKER, J. Carbon and nitrogen inputs differentially affect priming of soil organic matter in tropical lowland and montane soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 129, p. 212-222, 2019.

HUANG, J.; YU, H.; GUAN, X.; WANG, G.; GUO, R. Accelerated dryland expansion under climate change. **Nature climate change**, v. 6, n. 2, p. 166-171, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Basis. Contribution Of Working Group I To The Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021.

KAVAMURA, V.N.; TAKETANI, R.G.; LANÇONI, M.D.; ANDREOTE, F.D.; MENDES, R.; SOARES DE MELO, I. Water Regime Influences Bulk Soil and Rhizosphere of *Cereus jamacaru* Bacterial Communities in the Brazilian Caatinga Biome. **PLoS ONE**, v.8, n.9, p.e73606, 2013.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil biology and biochemistry**, v. 38, n. 3, p. 425-448, 2006.

LACERDA-JÚNIOR, G. V.; NORONHA, M. F.; CABRAL, L.; DELFORNO, T. P.; DE SOUSA, S. T. P.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; ... & OLIVEIRA, V. M. Land use and seasonal effects on the soil microbiome of a Brazilian dry forest. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 648, 2019.

LIU, H.; ZHENG, X.; LI, Y.; YU, J.; DING, H.; SVEEN, T. R.; ZHANG, Y. Soil moisture determines nitrous oxide emission and uptake. **Science of The Total Environment**, v. 822, p. 153566, 2022.

LOURENCO, E. R. C., DE SOUZA, B. I., D'ANDREA, A. F., & DE SOUZA, J. J. L. L. Temporal variation of soil CO₂ emission in different land uses in the Caatinga. **Applied Geography**, v. 140, p. 102661, 2022.

LUNA, R. G. D.; LUNA, J. G. D.; ANDRADE, A. P. D.; SOUTO, J. S.; GORLACH-LIRA, K. Biomassa e atividade microbianas em áreas de caatinga sob diferentes densidades de caprinos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 6, n. 12, p. 217-250, 2019.

LUNGUINHO, R. L.; DE SOUSA, B. I.; DE QUEIROZ, R. T.; CARDOSO, E. C. M. A Influência Dos Lajedos Na Composição Florística Do Seu Entorno, No Sítio Salambaia–Cabaceiras–PB. **Organograma Institucional**, p. 3459, 2015.

MA, L.; GUO, C.; LÜ, X.; YUAN, S.; WANG, R. Soil moisture and land use are major determinants of soil microbial community composition and biomass at a regional scale in northeastern China. **Biogeosciences**, p. 2585-2596, 2015.

MAESTRE, F. T.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; JEFFRIES, T. C.; ELDRIDGE, D. J.; OCHOA, V.; GOZALO, B.; ... & SINGH, B. K. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 51, p. 15684-15689, 2015.

MANZONI, S.; SCHIMEL, J. P.; PORPORATO, A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. **Ecology**, v. 93, n. 4, p. 930-938, 2012.

MARTINS, C.M.; GALINDO, I.C. de L.; SOUZA, E.R. de; POROCA, H.A. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido

do de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1883–1890, 2010.

MEDEIROS S. A.; NÓBREGA R. A.; NETO J. M. DE M.; BARRETO A. B.; VASCONCELOS G. N.; DINIZ R. R. S. Investigação da influência do El Niño e da La Niña sobre a variabilidade da precipitação na cidade de Patos, Paraíba. **Revista brasileira de geografia física**, v. 13, n. 01, p. 336-349, 2020.

MENEZES, R.; SAMPAIO, E.; GIONGO, V.; AND PÉREZ-MARIN, A. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Braz. J. Biol.** 72, 643–653, 2012.

MONTANO, N. M.; SANDOVAL-PÉREZ, A. L.; GARCÍA-OLIVA, F.; LARSEN, J.; GAVITO, M. E. Microbial activity in contrasting conditions of soil C and N availability in a tropical dry forest. **Journal of tropical ecology**, v. 25, n. 4, p. 401-413, 2009.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. 2.ed. 729p. Lavras, **Universidade Federal de Lavras**, 2006.

MOYANO, F. E.; MANZONI, S.; CHENU, C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 59, p. 72-85, 2013.

NEVES, L. V. D. M. W.; FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; ARAUJO, J. K. S.; DOS SANTOS, J. C. B.; ... & DE SOUZA JUNIOR, V. S. Microbial abundance and C and N stocks in tropical degraded Planosols from semiarid northeastern Brazil. **Catena**, v. 196, p. 104931, 2021.

NIELSEN, U. N.; BALL, B. A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. **Glob. Chang. Biol.** 21, 1407–1421, 2015.

NOTTINGHAM, A. T.; SCOTT, J. J.; SALTONSTALL, K.; BRODERS, K.; MONTERO-SANCHEZ, M.; PÜSPÖK, J.; ... & MEIR, P. Microbial diversity declines in warmed tropical soil and respiration rise exceed predictions as communities adapt. **Nature Microbiology**, v. 7, n. 10, p. 1650-1660, 2022.

OLIVEIRA, E. R. D. S., & de ALBUQUERQUE SOARES, W. Estimativa do Efluxo de Dióxido de Carbono em Resquícios de Caatinga. **Revista Diálogos**, v. 2, p. 121-137, 2016.

PAJARES, S.; CAMPO, J.; BOHANNAN, B. J.; ETCHEVERS, J. D. Environmental controls on soil microbial communities in a seasonally dry tropical forest. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 84, n. 17, p. e00342-18, 2018.

PAJARES, S.; ESCALANTE, A. E.; NOGUEZ, A. M.; GARCÍA-OLIVA, F.; MARTÍNEZ-PIEDRAGIL, C.; CRAM, S. S.; ... & SOUZA, V. Spatial heterogeneity of physicochemical properties explains differences in microbial composition in arid soils from Cuatro Ciénegas, Mexico. **PeerJ**, v. 4, p. e2459, 2016.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1031-1040, 2009.

PUGNAIRE, F. I.; MORILLO, J. A.; PEÑUELAS, J.; REICH, P. B.; BARDGETT, R. D.; GAXIOLA, A.; ... & VAN DER PUTTEN, W. H. Climate change effects on plant-soil feedbacks and consequences for biodiversity and functioning of terrestrial ecosystems. **Science advances**, v. 5, n. 11, p. eaaz1834, 2019.

SALGADO, E. V.; ANDRADE, E. M.; DE HEVIA, J. N.; NUNES, E. P.; RODRIGUES, M. M.; DE, A. (2015). Rainfall patterns and the contribution of litter in the caatinga dry tropical forest. *Rev. Ciência Agronômica* 46, 299–309.

SANTOS, D.C.; LIMA, C.L.R.; KUNDE, R.J.; CARVALHO, J.S.; ABEIJON, L.M.; PILLON, C.N. Agregação e proteção física da matéria orgânica em Planossolo háplico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p.28:54-63, 2012.

SANTOS, H. G. dos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF : Embrapa, 2018

SCHILLING, E. M.; WARING, B. G.; SCHILLING, J. S; POWERS, J. S. Forest composition modifies litter dynamics and decomposition in regenerating tropical dry forest. **Oecologia**, v. 182, p. 287-297, 2016.

SCHIMEL, J.; BALSER, T. C.; WALLENSTEIN, M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. **Ecology**, v. 88, n. 6, p. 1386-1394, 2007.

SCHWINNING, S.; SALA, O. E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, p. 211-220, 2004.

SILVA, E. E. da.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98). 2007b.

SILVA, E. E. da.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C). Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98). 2007a.

SONG, M. J.; SEO, Y. J.; LEE, H. Y. The dynamic relationship between industrialization, urbanization, CO₂ emissions, and transportation modes in Korea: empirical evidence from maritime and air transport. **Transportation**, v. 50, n. 6, p. 2111-2137, 2023.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; MIRANDA, J. R. P. D.; SANTOS, R. V. D.; ALVES, A. R. Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 151-160, 2008.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; CARDOSO, E. C. M.; DE MEDEIROS, J. R.; DA FONSECA, C. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Organic carbon rich-soils

in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **CATENA**, v.212, p.106101, 2022.

SÜNNEMANN, M.; ALT, C., KOSTIN, J.E.; LOCHNER, A.; REITZ, T.; SIEBERT, J.; EISENHAUER, N. Low-intensity land-use enhances soil microbial activity, biomass and fungal-to-bacterial ratio in current and future climates. **Journal of Applied Ecology**, v.58, n.11, p.2614-2625, 2021.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. **EMBRAPA**. 2017.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. Manual para interpretação de análise de solo. **Guaíba: agropecuária**, v. 247, 1997.

TRIVEDI, P.; ANDERSON, I. C.; SINGH, B. K. Microbial modulators of soil carbon storage: integrating genomic and metabolic knowledge for global prediction. **Trends in Microbiology**, v. 21, n. 12, p. 641-651, 2013.

VARGAS-TERMINEL, M. L.; FLORES-RENTERÍA, D.; SÁNCHEZ-MEJÍA, Z. M.; ROJAS-ROBLES, N. E.; SANDOVAL-AGUILAR, M.; CHÁVEZ-VERGARA, B.; ... & YÉPEZ, E. A. Soil Respiration Is Influenced by Seasonality, Forest Succession and Contrasting Biophysical Controls in a Tropical Dry Forest in Northwestern Mexico. **Soil Systems**, v. 6, n. 4, p. 75, 2022.

WAN, X.; CHEN, X.; HUANG, Z.; & CHEN, H. Y. Global soil microbial biomass decreases with aridity and land-use intensification. **Global Ecology and Biogeography**, v. 30, n. 5, p. 1056-1069, 2021.

WANG, Q.; ZHONG, M.; WANG, S. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 271, p. 91-97, 2012.

WARING, B. G.; POWERS, J. S. Unraveling the mechanisms underlying pulse dynamics of soil respiration in tropical dry forests. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 10, p. 105005, 2016.

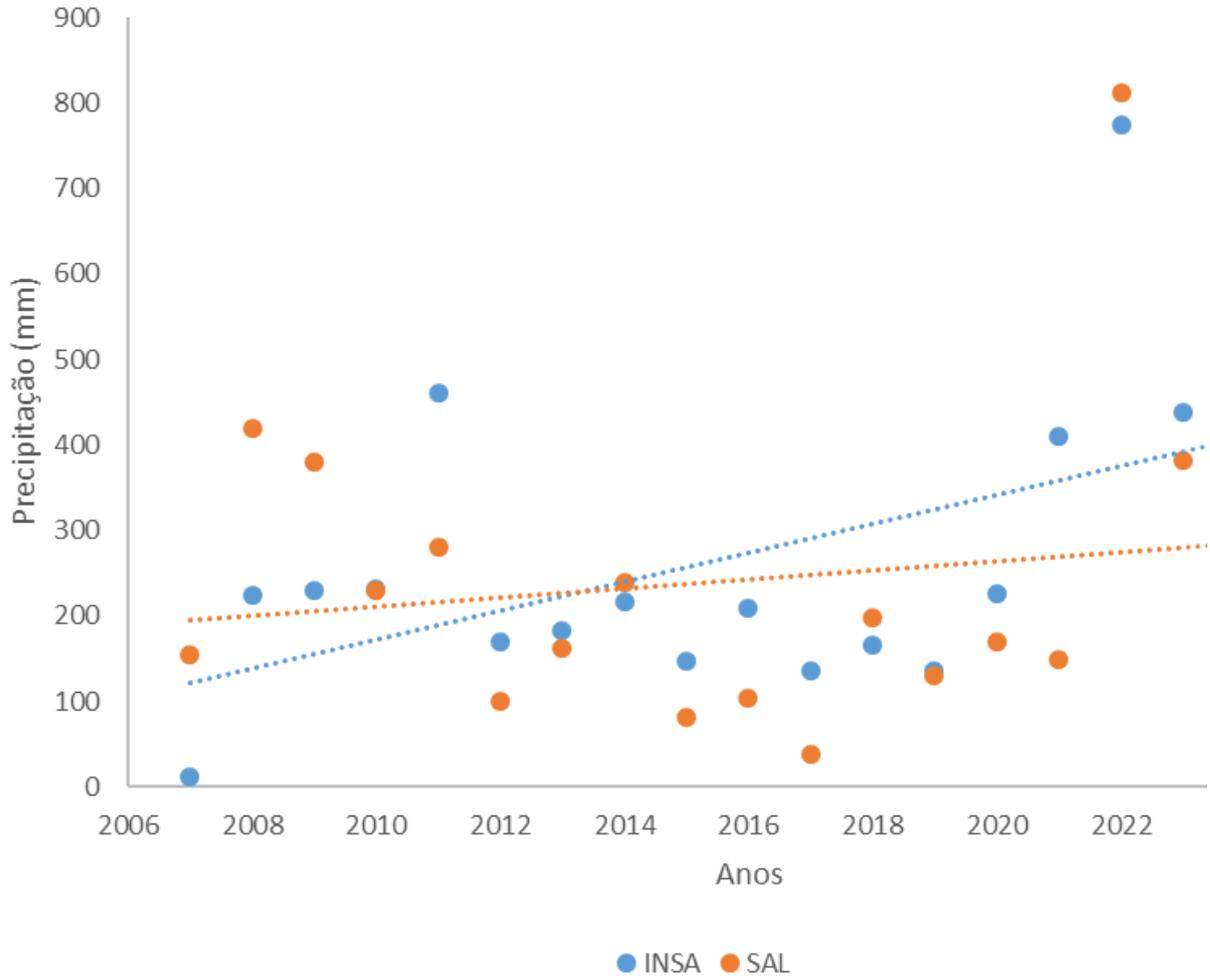
ZHANG, L.; YAN, Y.; XU, W.; SUN, J.; ZHANG, Y. Carbon emission calculation and influencing factor analysis based on industrial big data in the “double carbon” era. **Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 2022, 2022.

ZHAO, C.; MIAO, Y.; YU, C.; ZHU, L.; WANG, F.; JIANG, L. Soil microbial community composition and respiration along an experimental precipitation gradient in a semiarid steppe. **Sci. Rep.** 6:24317, 2016.

ZHOU, D.; ZHAO, S. Q.; LIU, S.; OEDING, J. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage, **Biogeosciences**, 10, 3691–3703, 2013.

ZHOU, H.; ZHANG, D.; WANG, P.; LIU, X.; CHENG, K.; LI, L.; ... & PAN, G. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A Meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 239, p. 80-89, 2017.

APÊNDICE A – HISTÓRICO DE PRECIPITAÇÃO (MM) NO INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA), EM CAMPINA GRANDE-PB E NA FAZENDA SALAMBAIA (SAL), CABACEIRAS-PB, DURANTE OS ANOS DE 2006-2022. DADOS DISPONIBILIZADOS PELA AESA-PB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

AGRADECIMENTOS

A priori peço licença para ser prolixo nessa parte tão singela do meu trabalho. Preciso tornar público a minha mais profunda alegria. Agradeço inicialmente ao Criador por todo o cuidado que teve comigo durante esses 22 anos de minha existência. Foram tantos livramentos e refrigérios que sem sua presença, acredito eu, não teria chegado ao ponto atual.

Em mim carrego muitos sonhos e esperanças para um futuro confortável e promissor. Assim, devo muitíssimo aos meus amados pais (Vandemberg e Inêz) e irmãos (Vanderson e Vinícius) por todo apoio e incentivo incansável. Sua prote-

ção e participação ativa no meu processo educacional foi a força motriz para a concretização de tudo. Por menor e primeiro que seja o passo, sempre recebo apoio, seja por intercessão ou de forma ativa. Lembrarei das suas participações, mesmo afadigados do trabalho nos meus projetos durante uma pandemia que reverberou em diversas áreas de nossas vidas. Mainha, painho, meu muito obrigado. Sou extremamente grato ao amor e carinho que recebo diariamente da minha família, aos meus bisas (vó Naide e vô Manuel *in memoriam*) e as minhas avós (Denise e Josefa) que sempre externaram o orgulho que sentem por mim.

Em especial gostaria de agradecer a pessoinha que me ensinou deliberadamente e de forma avassaladora o significado do amor incondicional, minha pequenina leãozinho, minha doce Aurora (*in memoriam*). Mesmo contra as expectativas, você foi resistente e se fez tão forte durante todo o processo que não poderia deixar de me ensinar a nunca desistir diante das adversidades. Sua passagem aqui na Terra foi curta, mas impactante na vida da sua mãe e na minha. Guardaremos sua lembrança, seu cheiro e seu pezinho em nossos corações. Obrigado por ser uma parte tão linda, minha filha.

Escrevo esses agradecimentos em lágrimas, não sabia que seria tão emotivo assim. Ao longo desses anos, diferentes pessoas passaram pela minha vida. Muitas dessas ficaram e outras acabaram se desencontrando. Mas todas elas deixaram impressões profundas em minha alma. Agradeço muitíssimo por cada palavra e cada intenção que vieram das mais diversas formas de demonstração de afeto. Não falarei nomes para evitar falhas humanas em esquecer algum apoiador, mas tudo está registrado em meu coração e nas ações compartilhadas.

Trago apenas, de uma forma simbólica, alguns grupos de pessoas pertencentes a essa bela jornada, aqui destaco: todos os meus alunos (INSA/INGÁ e Monte Carmelo/CG), meu colegas de trabalho e projetos da extensão universitária, meus amigos e parceiros da graduação em Biologia (noturno e diurno – foram realmente muitas aventuras nesses quatro anos), meus amigos de longa data que encontram sempre caminhos para retornar a minha vida, às novas amizades que surgiram tão espontaneamente que mudarão para sempre a forma que enxergarei as belezas e tristezas desse mundo azul. E também ao amor que um dia veio em resposta à minha oração, sua participação não poderia passar despercebida.

Agradeço à minha orientadora, profa. Avany Gusmão, pela confiança depositada e pelo seu dom do ensino. Em mim, como um, em breve, também licenciado, carrego a inspiração e representação de uma docência forte, baseada não só em transmitir informações, mas em compartilhar conhecimentos. Atualmente, já exerço a prática da docência e tento prazerosamente ser um referencial também na vida dos meus alunos. Aqui também agradeço a uma pessoa central no desenvolvimento desse projeto, meu Co-orientador, Marllon Andrade. Chefe, como costume chama-lo, sua parceria foi fundamental. Aprendi e cresci muito como pesquisador acompanhando seus passos. Aqui ainda agradeço à Igor Eloi, Mário Herculano e Socorro Lacerda que foram parceiros fortíssimos em trabalhos paralelos.

Agradeço também ao Departamento de Solos e Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em nome de duas pessoas centrais para a construção desse projeto, o Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza e o Dr. Flávio Cruz pela disponibilidade do espaço laboratorial para montagem e realização de todo o experimento.

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

to 001. Ao qual foi vinculado ao programa de Iniciação Científica, PIBIC-UEPB, cota 2021-2022 pela Universidade Estadual da Paraíba. Também agradeço ao Programa Ecológico de Longa Duração (PELD) – Rio Paraíba Integrado (FA-PESQ/PELD N° 21/2020, n° termo de outorga: 403/2021), ao qual este trabalho está vinculado à uma tese de doutorado em andamento.