



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DAVID MARX ANTUNES DE MELO**

**DINÂMICA DE CO<sub>2</sub> E SUAS RELAÇÕES COM VARIÁVEIS BIOFÍSICAS EM ÁREA  
DE CAATINGA**

**AREIA  
2025**

**DAVID MARX ANTUNES DE MELO**

**DINÂMICA DE CO<sub>2</sub> E SUAS RELAÇÕES COM VARIÁVEIS BIOFÍSICAS EM ÁREA DE CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Agricultura Tropical.

**Linha de pesquisa:** Ecologia, manejo e conservação dos recursos naturais

**Orientador:** Prof. Dr. Djail Santos

**Coorientador:** Prof. Dr. Aldrin Martin Pérez-Marin

**AREIA  
2025**

Catálogo na publicação  
Seção de Catalogação e Classificação

M528d Melo, David Marx Antunes de.  
Dinâmica de CO2 e suas relações com variáveis  
biofísicas em área de caatinga / David Marx Antunes de  
Melo. - Areia, 2025.  
64 f. : il.

Orientação: Djail Santos.  
Coorientação: Aldrin Martín Pérez-Marin.  
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Caatinga. 3. Carbono. 4.  
Solo-Planta-Atmosfera. 5. Mudanças climáticas. I.  
Santos, Djail. II. Pérez-Marin, Aldrin Martín. III.  
Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635 (043.2)

**DAVID MARX ANTUNES DE MELO**

**DINÂMICA DE CO<sub>2</sub> E SUAS RELAÇÕES COM VARIÁVEIS BIOFÍSICAS EM ÁREA DE CAATINGA**

Aprovado em: 26/07/2023

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



DJAIL SANTOS  
Data: 27/07/2023 08:54:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Djail Santos (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente



DIEGO SILVA BATISTA  
Data: 27/07/2023 17:27:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Diego Silva Batista – Avaliador Interno

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente



JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA  
Data: 28/07/2023 11:17:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha – Avaliador Externo

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Documento assinado digitalmente



BERGSON GUEDES BEZERRA  
Data: 28/07/2023 17:47:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Bergson Guedes Bezerra – Avaliador Externo

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Documento assinado digitalmente



JOSE ROMUALDO DE SOUSA LIMA  
Data: 27/07/2023 18:01:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Romualdo de Souza Lima – Avaliador Externo

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE)

*À minha mãe biológica, Geyza Antunes de Melo, (in memoriam), à minha mãe de criação Margarida Melo, ao meu pai Severino Antunes, a todos meus tios e ao meu irmão Johann's.*

**Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a minha família, principalmente minha mãe Margarida por sempre estar me apoiando em minhas realizações pessoais e profissionais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, à coordenação, a todos os professores e aos colegas estudantes do programa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo de processo:88887.497428/2020-00.

Aos pesquisadores e servidores do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), especialmente ao Núcleo de Desertificação e Agroecologia pelo imenso suporte e apoio na construção deste trabalho.

A todas as pessoas que de forma direta e indireta contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao CCA-UFPB pelas oportunidades proporcionadas ao longo do curso.

## RESUMO GERAL

A Caatinga possui grande potencial na prestação de serviços ecossistêmicos, sobretudo em relação ao balanço de CO<sub>2</sub> no sistema solo-vegetação-atmosfera. Apesar disso, ainda existem dúvidas de como a Caatinga responderá aos impactos das variáveis biofísicas inerentes ao balanço de CO<sub>2</sub> frente às mudanças climáticas. O objetivo foi avaliar a dinâmica de CO<sub>2</sub> e suas relações com variáveis biofísicas no sistema solo-vegetação-atmosfera em uma área de Caatinga. A hipótese do presente trabalho é: se as variáveis biofísicas determinam a dinâmica de CO<sub>2</sub> no sistema solo-planta-atmosfera na Caatinga, então as condições climáticas o definem, porque o clima regula os processos de produtividade e respiração do ecossistema. A pesquisa foi realizada na Estação Experimental Professor Ignácio Salcedo, do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil, em um fragmento de Caatinga em regeneração há aproximadamente 70 anos, em um Neossolo Litólico. O fluxo de CO<sub>2</sub> no sistema solo-Caatinga-atmosfera foi medido por meio de aparelho IRGA soil-efflux e medidas de Eddy Covariance com medições diárias, numa torre micrometeorológica entre 2021 e 2022. Os dados foram processados por meio de análises diárias das médias do fluxo de CO<sub>2</sub> e demais variáveis em intervalos sazonais, análises de regressão, seleção de modelo e modelagem de equações estruturais. Os resultados mostraram que o comportamento dos componentes dos fluxos de CO<sub>2</sub> variaram em função da magnitude e distribuição das chuvas, apresentando variação com as menores taxas durante a estação seca e maiores taxas durante a estação úmida. O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (respiração do solo) na área estudada foi controlada pela umidade e temperatura do solo. Mesmo na estação seca a produtividade primária bruta se manteve com valores moderados e obteve seu pico na estação chuvosa. A respiração do ecossistema foi máxima nos meses chuvosos e mínima durante os meses secos devido à baixa umidade no solo. Mesmo durante a estação seca, a troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema esteve em equilíbrio e a Caatinga funcionou como um sumidouro atmosférico de CO<sub>2</sub> durante o período de estudo. Esta pesquisa contribui para o maior entendimento da variabilidade do fluxo de CO<sub>2</sub> no sistema solo-planta-atmosfera em florestas sazonalmente secas do tipo Caatinga, ainda muito escassas na literatura.

**Palavras-chaves:** caatinga; carbono; solo-planta-atmosfera; mudanças climáticas.

## GENERAL ABSTRACT

The Caatinga forest has great potential in providing ecosystem services, especially in relation to the CO<sub>2</sub> flux balance in the soil-plant-atmosphere system. Despite this, there are still doubts about how the Caatinga will respond to the impacts of biophysical variables inherent in the CO<sub>2</sub> balance in the face of climate change. The objective was to evaluate the impacts of biophysical variables on the CO<sub>2</sub> flux in the soil-plant-atmosphere system in a Seasonally Dry Tropical Forest. Under the hypothesis: if the biophysical variables determine the flow of CO<sub>2</sub> in the soil-plant-atmosphere system in the caatinga, then the climatic conditions define it, because the climate regulates the processes of productivity and respiration of the ecosystem. The research was carried out at the Professor Ignácio Salcedo Experimental Station, of the Instituto Nacional do Semiárido, in the municipality of Campina Grande, Paraíba, Brazil, in a fragment of seasonally dry tropical forest under regeneration for approximately 50 years, under a lithosol Neosol. The CO<sub>2</sub> flux was measured in a micrometeorological tower using an irga soil-flux device and Eddy Covariance measurements with daily measurements, between 2021 and 2022. The data were processed through daily analyzes of the CO<sub>2</sub> flux averages and other variables on seasonal intervals, regression analyses, model selection and structural equation modeling. The results showed that the behavior of the CO<sub>2</sub> flux components varied as a function of the magnitude and distribution of rainfall, showing variation with the lowest rates during the dry season and the highest rates during the wet season. Soil CO<sub>2</sub> flux in the studied area is mainly controlled by soil moisture. Even in the dry season, gross primary productivity remained at moderate values and reached its peak in the rainy season. Ecosystem respiration was maximum in the rainy months and minimum during the dry months due to low soil moisture. Even during the dry season, the ecosystem's net CO<sub>2</sub> exchange was in equilibrium and the Caatinga acted as an atmospheric CO<sub>2</sub> sink during the study period. This research contributes to a better understanding of the CO<sub>2</sub> flux variability in the soil-plant-atmosphere system in seasonally dry forests of the Caatinga type, still very scarce in the literature.

**Key-words:** caatinga; carbon; soil-plant-atmosphere; climate change.

## SUMÁRIO

<b>1 SEÇÃO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	13
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	16
<b>2 SEÇÃO II - REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
2.1 VEGETAÇÃO CAATINGA .....	17
2.2 FLUXO DE CO <sub>2</sub> .....	18
2.3 VARIÁVEIS BIOFÍSICAS .....	19
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	21
<b>3 SEÇÃO III - RELAÇÃO DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> NO SOLO COM VARIÁVEIS FÍSICAS EM DIFERENTES PROFUNDIDADES SOB ÁREA DE CAATINGA</b> .....	23
<b>RESUMO</b> .....	23
<b>ABSTRACT</b> .....	24
3.1 INTRODUÇÃO .....	25
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
<b>3.2.1 Descrição da área de estudo</b> .....	26
<b>3.2.2 Coleta dos dados</b> .....	28
<b>3.2.3 Análise dos dados</b> .....	29
3.4 RESULTADOS .....	29
<b>3.4.1 Análises descritivas do efluxo de CO<sub>2</sub> e variáveis do solo</b> .....	29
<b>3.4.2 Variabilidade sazonal entre o efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo</b> .....	30
<b>3.4.3 Relação entre efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo</b> .....	32
3.5 DISCUSSÃO .....	34
<b>3.5.1 Variabilidade sazonal do efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo</b> .....	34
<b>3.5.2 Relação do efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo</b> .....	36
<b>3.5.3 Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo</b> .....	37
3.6 CONCLUSÕES .....	38
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39
<b>4 SEÇÃO IIII - IMPACTOS DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS NO FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM UMA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA</b> .....	42
<b>RESUMO</b> .....	42
<b>ABSTRACT</b> .....	43
4.1 INTRODUÇÃO .....	44
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	45
<b>4.2.1 Descrição da área de estudo</b> .....	45
<b>4.2.2 Variáveis analisadas</b> .....	47
<b>4.2.3 Instrumentação e medições</b> .....	48
<b>4.2.4 Processamento dos dados</b> .....	49
4.2.4.1 Troca líquida do ecossistema .....	49
4.2.4.2 Controle de qualidade e detecção de dados fora da curva.....	49
4.2.4.3 Particionamento do Fluxo de CO <sub>2</sub> .....	50
4.2.4.4 Evapotranspiração e Uso eficiente da água.....	51
<b>4.2.5 Estado da vegetação</b> .....	52
<b>4.2.6 Análises estatísticas</b> .....	52

4.3 RESULTADOS .....	53
4.3.1 Condições ambientais e EVI .....	53
4.3.2 Variabilidade dos fluxos de CO <sub>2</sub> .....	54
4.3.3 Relação causal entre o fluxo de CO <sub>2</sub> e variáveis biofísicas.....	55
4.3.4 Relação entre Troca Líquida de CO <sub>2</sub> do Ecossistema e radiação global.....	56
4.3.5 Variações diurnas de Reco e NEE com temperatura do solo e do ar.....	57
4.4 DISCUSSÃO .....	58
4.4.1 Condições ambientais e EVI .....	58
4.4.2 Variabilidade dos fluxos de CO <sub>2</sub> .....	59
4.4.3 Relação causal entre o fluxo de CO <sub>2</sub> e variáveis biofísicas.....	59
4.4.4 Relação entre Troca Líquida de CO <sub>2</sub> do Ecossistema e radiação global.....	60
4.4.5 Variações diurnas de Reco e NEE com temperatura do solo e do ar.....	61
4.4.6 Troca líquida de CO <sub>2</sub> no ecossistema.....	62
4.5 CONCLUSÕES .....	63
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 SEÇÃO I - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas tomaram dimensões preocupantes, passando de ser apenas mais um problema de questão ambiental para uma questão mais complexa e emergente, principalmente em relação ao ciclo do carbono nos sistemas solo-planta-atmosfera (Costa Lourenço et al., 2022). Com a intensificação das mudanças climáticas e o aumento da emissão do gás carbônico (CO<sub>2</sub>), fenômenos como El Niño e La Niña estão se tornando mais frequentes e progressivamente afetando negativamente áreas cada vez maiores (Glotfelty; Zhang, 2017). Diante disso, os ecossistemas áridos, semiáridos e subúmidos secos por ocuparem cerca de 45% da superfície terrestre (Pravalié et al., 2016) e estocarem aproximadamente 15,5% do carbono global no solo, possuem enorme potencial para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Ferreira et al., 2018). Estes ecossistemas em todo o mundo com suas formações fisiográficas estão possuindo destaque no controle das tendências de escala global observadas nas últimas décadas (Glotfelty; Zhang, 2017). As florestas são amplamente consideradas como tendo o maior potencial para atuar como sumidouros de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Na América do Sul, e em específico em Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS), a Caatinga é considerada uma das florestas maiores e mais diversas do mundo, com uma área de 862.639 km<sup>2</sup> (Banda et al., 2016), cujo domínio fitogeográfico registra baixa disponibilidade hídrica no solo devido à alta variabilidade anual e sazonal da precipitação, temperatura entre outras variáveis biofísicas (Costa Lourenço et al., 2022).

A Caatinga é o principal bioma do Nordeste brasileiro, sendo identificado como uma das áreas de vida selvagem mais importantes do planeta composta principalmente por fisionomias xerófilas, lenhosas, espinhosas, decíduas com predominância de árvores, arbustos e cactos altamente endêmicos (Borges et al., 2020). Entretanto, sua paisagem está mudando devido às intensas atividades humanas, principalmente o desmatamento e queimadas, com grandes áreas de vegetação nativa sendo substituídos por áreas agrícolas, especulação imobiliária, entre outros fatores (Santos et al., 2014; Oliveira et al., 2023). Estes processos têm implicações importantes nos fluxos de carbono e água na interface solo-vegetação-atmosfera (Mendes et al., 2020).

Pesquisas em relação ao fluxo do carbono têm recebido maior atenção devido às crescentes concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico. Apesar disso, ainda há muito a ser estudado e investigado a respeito da variabilidade do CO<sub>2</sub> no sistema solo-vegetação-atmosfera, em regiões semiáridas, que ainda são muito menos compreendidas do que florestas úmidas (Santos et al., 2014; Costa Lourenço et al., 2022). Assim, Mendes et al., (2020) defendem que a fixação do carbono por parte das FTSS ainda não é bem compreendida, tornando-se necessário que sejam desenvolvidas diversas pesquisas acerca do tema. Os efeitos pelo uso inadequado da terra causam danos e podem interferir na fixação do carbono como também no clima local. Da mesma forma, estes ambientes florestais de Caatinga também podem possuir um grande potencial de emissão de CO<sub>2</sub> via respiração do solo e do ecossistema em geral (Lima et al., 2020).

Desse modo, a Caatinga no Semiárido brasileiro a sua importância na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, como também por outros tipos de florestas tropicais secas, ainda não foi suficientemente estudada. Assim, a avaliação do fluxo do CO<sub>2</sub> na Caatinga fornece informações críticas sobre a capacidade das florestas de assegurar suas diversas funções e o fornecimento valiosos serviços ecossistêmicos. A importância da Caatinga para o clima regional é, portanto, inquestionável, mas sua vulnerabilidade à seca e aos riscos associados a um clima mais seco é incerta, devido aos poucos estudos nesta região. Uma das etapas mais importantes nesse processo é a investigação da dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> e suas relações com as variáveis biofísicas, tais como: radiação, precipitação, umidade, temperatura evapotranspiração, entre outras, em áreas de Caatinga.

Portanto, de acordo com as reflexões realizadas, esta pesquisa visa contribuir para responder à seguinte questão: Como se deu a dinâmica do do fluxo de CO<sub>2</sub> e quais suas relações com variáveis biofísicas no sistema solo-planta-atmosfera na Caatinga no período de la Niña?

Diante disso, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> e suas relações com variáveis biofísicas no sistema solo-planta-atmosfera em uma área de Caatinga.

Para isso, foram divididas as informações produzidas neste trabalho em dois artigos:

No artigo I: "Relação de efluxo de CO<sub>2</sub> no solo com variáveis físicas em diferentes profundidades sob área de Caatinga". Foi levantada a hipótese de que, se

a disponibilidade hídrica do solo é um componente modulador dos processos de sua respiração, então os períodos mais chuvosos aumentam a taxa de CO<sub>2</sub> do solo porque a água é um fator limitante nos processos ecológicos na Caatinga. O objetivo foi avaliar a relação de efluxo de CO<sub>2</sub> no solo com variáveis físicas em diferentes profundidades sob área de Caatinga. Este artigo foi submetido ao periódico Agriambi com o qualis Capes A3.

No artigo II: “Impactos de variáveis biofísicas no fluxo de CO<sub>2</sub> em área de Caatinga”, levantou-se a hipótese de que, se as variáveis biofísicas determinam o fluxo de CO<sub>2</sub> na Caatinga, então as condições climáticas definem o fluxo CO<sub>2</sub>, porque o clima regula os processos de produtividade e respiração do ecossistema. O objetivo foi avaliar os impactos das variáveis biofísicas no fluxo de CO<sub>2</sub> em uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca. Este artigo será submetido ao periódico Ecological Research com o Qualis Capes A2.

## REFERÊNCIAS

- Banda, K.R., Delgado-Salinas, A., Dexter, K.G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez, G.M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren, A. B., Arteaga, J. C., Aymard, G., Castaño, A., Ceballos-Mago, N., Pennington, R.T. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*. 353(80), 1383–1388. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5080>
- Borges, C.K., dos Santos, C.A.C., Carneiro, R.G., Silva, L.L., de Oliveira, G., Mariano, D., Silva, M.T., da Silva, B.B., Bezerra, B.G., Perez-Marin, A.M., Medeiros, S.S., (2020). Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. *Environ. Monit. Assess.* 192, 524. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- Costa Lourenço, E.R., Souza, B.I., D'Andrea, A.F., Souza, J.J.L.L. (2022). Temporal variation of soil CO<sub>2</sub> emission in different land uses in the Caatinga. *Applied Geography*. 140-102661. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102661>
- 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.S.C. (2018). Soil CO<sub>2</sub> efflux measurements by alkali absorption and infrared gas analyzer in the Brazilian semiarid region. *Rev Bras Cienc Solo*. 42:0160563. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160563>
- Glotfelty, T.; Zhang, Y. (2017). Impact of future climate policy scenarios on air quality and aerosol–cloud interactions using an advanced version of CESM/CAM5: Part II. Future trend analysis and impacts of projected anthropogenic emissions. *Atmos. Environ.* 152, 531–552. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.034>
- 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. *Rev Bras Cienc Solo*. 44:0200092. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200092>
- Mendes, K.R., Campos, S., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Perez- Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., Vieira, M.M.L., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Bezerra, B.G., Silva, C.M.S., (2020). Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Sci. Rep.* 10, 9454. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Oliveira, C.L., Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Antonino, A.C.D., Alves, M.F.A.T., Silva, V.P., Lopes, M.H.L., Souza, E.S., Ferreira, R.C., (2023). A Caatinga emite ou sequestra carbono?. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.16, n.02, 791-804.
- Pravalie, R. (2016). Drylands extent and environmental issues. A global approach. *Earth-Science Reviews*. 161, 259-278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.003>
- Santos, M.G.; Oliveira, M.T.; Figueiredo, K.V.; Falcão, H.M.; Arruda, E.C.P.; De Almeidacortez, J.S.; Sampaio, E.V.S.B.; Ometto, J.P.H.B.; Menezes, R.S.C.; Oliveira,

A.F.M.; et al. (2014). Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: Can it tolerate climate changes? *Theor. Exp. Plant Physiol.* 26, 83–99. <http://10.1007/s40626-014-0008-0>

## 2 SEÇÃO II - REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 VEGETAÇÃO CAATINGA

O Semiárido brasileiro é a região semiárida mais populosa do mundo, sendo a maior parte dessa região ocupada pelo bioma Caatinga, cuja vegetação é constituída por espécies lenhosas, herbáceas, cactáceas e bromeliáceas. Aproximadamente 932 espécies já foram registradas para a região, das quais 380 são endêmicas (Santos et al., 2014). A vegetação Caatinga está amplamente distribuídas em diferentes fitofisionomias em toda a região Nordeste e norte de Minas Gerais, abrangendo uma área de aproximadamente 862.639 km<sup>2</sup> representando cerca de 11% do território brasileiro (Banda et al., 2016).

Os baixos índices pluviométricos, as altas temperaturas e a predominância de solos rasos e pedregosos, que armazenam pouca água, contribuem para uma vegetação sem características uniformes, assentada sobre uma área com diferentes estruturas geológicas, e composta por mosaicos de florestas secas e vegetação arbustiva, com enclaves de florestas úmidas (Oliveira et al., 2021).

A Caatinga é extremamente heterogênea em termos de composição e estrutura e essas mudanças são facilmente relacionadas com variações pedológicas. Dessa forma, as fisionomias de Caatinga são muito variáveis, dependendo do regime de chuvas e do tipo de solo, variando de florestas altas em localidades mais úmidas, até afloramentos de rochas com arbustos baixos esparsos e espalhados, com cactos e bromeliáceas nas fendas (Banda et al., 2016).

No entanto, a Caatinga não obteve o destaque que merece, sendo sempre colocada em segundo plano quando se discutem políticas para o estudo e a conservação da biodiversidade do país (Mendes et al., 2020). A urgência em definir uma política para conservação da biodiversidade da Caatinga fica patente quando se considera as estimativas da área do bioma que já foi alterada pelo homem, principalmente em função da agropecuária e retirada de lenha para geração de energia.

Dado esse quadro, espera-se rápida perda de espécies únicas, eliminação de processos chave nos sistemas ecológicos e formação de extensos núcleos de desertificação em vários setores da região (Oliveira et al., 2021).

Recentemente, a Caatinga foi reconhecida como uma das 37 “Grandes Regiões Naturais do Mundo” (Mendes et al., 2021), e desempenha um papel importante na manutenção do processo macro-ecológico regional, bem como apoia indiretamente regiões com maior diversidade e endemismo no Brasil e no mundo (Lima et al., 2020).

## 2.2 FLUXO DE CO<sub>2</sub>

A Caatinga, abriga uma complexa rede de interações entre solo-vegetação e atmosfera que desempenha um papel fundamental na regulação do dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e, por conseguinte nas mudanças climáticas globais. O fluxo de CO<sub>2</sub> neste bioma está intrinsicamente relacionado a variabilidade climática e à adaptação das plantas e condições semi-áridas (Silva et al., 2017).

O dióxido de carbono é um componente de grande importância na composição do ar atmosférico. É inofensivo em taxas consideradas normais e desempenha o papel de “vidro de estufa”, recebendo assim o nome de “Gás de efeito estufa”, juntamente com o metano (CH<sub>4</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), os clorofluorcarbonos (CFCS) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), os principais gases do efeito estufa (Lima et al., 2020).

O sistema solo-planta é o grande responsável pela absorção e estocagem do CO<sub>2</sub>, sendo de grande importância para o balanceamento e equilíbrio deste elemento para a atmosfera. As plantas tanto fixam como emitem gás, ocorrendo a emissão através da morte e decomposição de florestas mortas ou a combustão desse material. Ao ocorrer a fixação do CO<sub>2</sub>, a floresta está tendo a função de “sumidouro” e quando está ocorrendo a emissão a mesma age como “fonte”. Essas funções demonstram a importância das florestas vivas, quando se deseja uma maior absorção do que emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Silva et al., 2021).

O fluxo de CO<sub>2</sub> é particionado em três componentes, tais como: A Troca Líquida de CO<sub>2</sub> entre o ecossistema e a atmosfera (NEE) é referente ao balanço entre o carbono assimilado e emitido, sendo a absorção ou assimilação de carbono via fotossíntese da vegetação, denominada Produtividade Primária Bruta (GPP) e a emissão através da Respiração do Ecossistema (R<sub>eco</sub>), onde o termo Reco é a

combinação entre a respiração autotrófica das plantas e a respiração heterotrófica dos animais, fungos e microorganismos (Ribeiro et al., 2016).

Juntos, esses componentes são essenciais para entender as dinâmicas do fluxo de CO<sub>2</sub> em ecossistemas terrestres e seu papel nas mudanças climáticas. A compreensão desses conceitos na Caatinga é fundamental para avaliar a contribuição desse bioma para o ciclo global do carbono, bem como para desenvolver estratégias de conservação e manejo sustentável que considerem as complexas dinâmicas do carbono nesse ambiente Semiárido (Costa et al., 2022).

### 2.3 VARIÁVEIS BIOFÍSICAS

As variáveis biofísicas são medidas e observações relacionadas as características físicas e biológicas de um determinado ambiente (Campos et al., 2019). Por sua vez, estas variáveis desempenham um papel crucial em análises ambientais e climáticas, permitindo a compreensão dos processos naturais que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, de como a Caatinga funciona, como os organismos se adaptam às condições adversas e como esta vegetação responde às mudanças climáticas (Marques et al., 2020). A compreensão dessas variáveis em áreas de Caatinga é fundamental para entender melhor suas características e para estratégias de conservação, uso e manejo sustentável deste Bioma (Borges et al., 2020).

Abaixo, estão citados as os conceitos das variáveis biofísicas utilizadas nesta pesquisa:

Radiação global (R<sub>g</sub>): é a energia solar total que atinge a superfície terrestre, incluindo a radiação direta e difusa; Chuva: é a precipitação de água na forma líquida que cai da atmosfera para a superfície terrestre; Déficit de Pressão de Vapor (VPD): é a diferença entre a pressão de vapor de água na superfície da folha e a pressão de vapor saturante na atmosfera; Evapotranspiração (ET): é a perda de água da superfície da Terra para a atmosfera, resultante da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas; Temperatura do ar (T<sub>air</sub>): é a medida da temperatura do ar na atmosfera; Temperatura do solo (T<sub>soil</sub>): é a temperatura do solo em diferentes profundidades. Umidade relativa (Rh): é a medida da quantidade de vapor de água presente na atmosfera em relação à quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter a uma determinada temperatura, sem que ocorra condensação; Calor

sesível (H): é uma forma de energia térmica que pode ser medida sendo associada à temperatura de um corpo ou substância. Eficiência no Uso de Água (WUE): é a quantidade de água necessária para a planta produzir uma unidade de biomassa.

Essas variáveis na Caatinga são interdependentes e desempenham papéis complexos na dinâmica desse ecossistema. A utilização dessas variáveis é essencial para compreender e conservar a Caatinga e desempenham papéis interconectados fundamentais na gestão dos recursos naturais (Silva et al., 2021). A integração dessas variáveis é essencial para uma compreensão abrangente dos sistemas terrestres e da interação entre biosfera e atmosfera.

## REFERÊNCIAS

- Banda, K.R., Delgado-Salinas, A., Dexter, K.G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez, G.M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren, A. B., Arteaga, J. C., Aymard, G., Castaño, A., Ceballos-Mago, N., Pennington, R.T. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*. 353(80), 1383–1388. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5080>
- Borges, C.K., Santos, C.A.C., Carneiro, R.G., Silva, L.L., de Oliveira, G., Mariano, D., Silva, M.T., da Silva, B.B., Bezerra, B.G., Perez-Marin, A.M., Medeiros, S.S., 2020. Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. *Environ. Monit. Assess.* 192, 524. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- Campos, S., Mendes, K.R., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Medeiros, S.S., Amorim, L.B., dos Santos, C.A.C., Perez-Marin, A.M., Ramos, T.M., Marques, T.V., Lucio, P.S., Costa, G.B., e Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., 2019. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agric. For. Meteorol.* 271, 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>
- Costa, G.B., Mendes, K.R., Viana, L.B., Almeida, G.V., Mutti, P.R., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., Marques, T.V., Ferreira, R.R., Oliveira, C.P., et al., 2022. Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 14, 3955. <https://doi.org/10.3390/rs14163955>
- 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. *Rev Bras Cienc Solo*. 44:0200092. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200092>
- Marques, T.V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A.M., Campos, S., Lúcio, P.S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T.M., da Silva, D.F., Oliveira, C.P., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., e Silva, C.M.S., Bezerra, B., 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agric. For. Meteorol.*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Mendes, K.R., Campos, S., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Perez- Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., Vieira, M.M.L., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Bezerra, B.G., Silva, C.M.S., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Sci. Rep.* 10, 9454. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Mendes, K.R., Campos, S., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Ramos, T.M., Marques, T.V., Reis, J.S., Lima Vieira, M.M., Silva, A.C.N., Marques, A.M.S., et al. 2021. Assessment of SITE for CO<sub>2</sub> and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). *Forests*. 12, 86. <https://doi.org/10.3390/f12010086>

Oliveira, M.L., Santos, C.A.C., Oliveira, G., Perez-Marin, A.M., Santos, C.A.G., 2021. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>

Ribeiro, K., Sousa-Neto, E.R., Carvalho, J.A., Lima, J.R.S., Menezes, R.S.C., Duarte-Neto, P.J., Guerra, G.S., Ometto, J.P.H.B. (2016). Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. *Sci Total Environ*. 571:1048-57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>

Santos, M.G.; Oliveira, M.T.; Figueiredo, K.V.; Falcão, H.M.; Arruda, E.C.P.; De Almeida-cortez, J.S.; Sampaio, E.V.S.B.; Ometto, J.P.H.B.; Menezes, R.S.C.; Oliveira, A.F.M.; et al. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: Can it tolerate climate changes? *Theor. Exp. Plant Physiol*. 2014, 26, 83–99. <http://10.1007/s40626-014-0008-0>

Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Alves, E.M. 2017. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *J. Arid Environ*. 147, 71–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>

Silva, A.C., Mendes, K.R., Silva, C.M.S., Rodrigues, D.T., Costa, G.B., da Silva, D.T.C., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Bezerra, B.G., 2021. Energy Balance, CO<sub>2</sub> Balance, and Meteorological Aspects of Desertification Hotspots in Northeast Brazil. *Water*, 13, 2962. <https://doi.org/10.3390/w13212962>

## SEÇÃO III - RELAÇÃO DO EFLUXO DE CO<sub>2</sub> NO SOLO COM VARIÁVEIS FÍSICAS EM DIFERENTES PROFUNDIDADES SOB ÁREA DE CAATINGA

### RESUMO

O efluxo de CO<sub>2</sub> no solo (ECO<sub>2</sub>) é um dos principais processos que controlam o balanço de carbono nos ecossistemas terrestres, sobretudo em florestas secas. Ainda são escassos os estudos de ECO<sub>2</sub> do solo e como é afetada pelas variáveis hidrológicas do solo na floresta sazonalmente seca tropical em domínio de Caatinga, no semiárido brasileiro. Assim, o objetivo foi avaliar a relação de efluxo de CO<sub>2</sub> no solo com variáveis físicas em diferentes profundidades sob área de Caatinga. Considerando a seguinte hipótese: se a disponibilidade hídrica do solo é um componente modulador dos processos de sua respiração, então os períodos mais chuvosos aumentam a taxa de CO<sub>2</sub> do solo, porque a água é um fator limitante nos processos ecológicos na Caatinga. A pesquisa foi realizada na Estação Experimental Professor Ignácio Salcedo, do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil, em um fragmento de Caatinga sob regeneração há aproximadamente 70 anos, sob um Neossolo Litólico. O fluxo de CO<sub>2</sub> foi medido por meio de um analisador de gás por infravermelho, modelo IRGA soil-flux, com medições diárias, entre agosto de 2021 a agosto de 2022. Também aferiu diariamente a temperatura do solo e umidade do solo em três camadas (0-5, 5-10 e 10-20 cm). O processamento dos dados se fez por meio de médias diárias e seleção do melhor modelo estatístico. O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo apresentou variação, com as menores taxas durante a estação seca e maiores taxas durante a estação úmida. O melhor modelo apontou que a variabilidade temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi afetada por 65% pela umidade do solo e 61% pela temperatura do solo na camada de 05 a 10 cm por haver maior retenção de umidade. O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo na área estudada é controlado principalmente pela umidade do solo.

**Palavras-Chave:** respiração do solo; seleção de modelos; semiárido paraibano.

### SECTION III - RELATIONSHIP OF CO<sub>2</sub> EFFLUX INTO THE SOIL WITH PHYSICAL VARIABLES AT DIFFERENT DEPTHS UNDER CAATINGA AREA

#### ABSTRACT

Soil CO<sub>2</sub> efflux (ECO<sub>2</sub>) is one of the main processes that control the carbon balance in terrestrial ecosystems, especially in dry forests. Soil ECO<sub>2</sub> studies are still scarce and how it is affected by soil hydrological variables in the seasonally dry tropical forest in the Caatinga domain, in the Brazilian semi-arid region. Thus, the objective of this work was to evaluate the effects of soil water availability on the CO<sub>2</sub> efflux of a Neosol in a seasonally dry tropical forest in the Brazilian semi-arid region. Considering the following hypothesis: if soil water availability is a modulating component of its respiration processes, then the rainiest periods increase the soil CO<sub>2</sub> rate because water is a limiting factor in ecological processes in the Caatinga. The research was carried out at the Professor Ignácio Salcedo Experimental Station, of the Instituto Nacional do Semiárido, in the municipality of Campina Grande, Paraíba, Brazil, in a fragment of seasonally dry tropical forest under regeneration for approximately 50 years, under a lithosol Neosol. The CO<sub>2</sub> efflux was measured using an IRGA soil-efflux device, with daily measurements, between August 2021 and August 2022. It also measured soil temperature, soil moisture and matric potential at three depths (0-5, 5-10 and 10-20 cm). Data processing was performed through descriptive analysis with daily means, selection of the best statistical model with the lowest Akaike Information Criterion (AIC) and regression test. Soil CO<sub>2</sub> efflux showed variation, with the lowest rates during the dry season and the highest rates during the wet season. The best statistical model indicated that the temporal variability of soil CO<sub>2</sub> efflux was affected by ( $R^2 = 65$ ) by soil moisture and ( $R^2 = 61$ ) by soil temperature at a depth of 05 to 10 cm. Soil CO<sub>2</sub> efflux in the studied area is mainly controlled by soil moisture. This research contributes to a better understanding of the variability of the CO<sub>2</sub> flow in the soil in seasonally dry forests of the Caatinga type, still very scarce in the literature.

**Key-Words:** soil respiration; model selection; semi-arid Paraíba.

### 3.1 INTRODUÇÃO

O efluxo de CO<sub>2</sub> (ECO<sub>2</sub>) no solo é resultante do metabolismo e respiração das plantas (raízes e micorrizas), fauna do solo e microorganismos (decompositores) que determinam processos biogeoquímicos no solo (Vargas-Terminel et al., 2022). Este efluxo compreende o segundo maior efluxo de CO<sub>2</sub> representando o principal componente da respiração do ecossistema (R<sub>eco</sub>) (Shi et al., 2015).

O ECO<sub>2</sub> liberado em ambientes secos para a atmosfera via Respiração do Solo (SR) também desempenha um papel fundamental no ciclo global de Carbono (C) (Liu et al., 2017). Assim, a respiração do solo é um componente importante do ciclo global de C, em que variações dessa respiração podem influenciar de forma proeminente a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>. O fato de a vegetação capturar parte do CO<sub>2</sub> liberado do solo é um dos principais motivos para que a conservação desses ecossistemas e sua manutenção sejam cruciais.

Quando ocorre a liberação do CO<sub>2</sub> do solo, parte é capturada pela vegetação e o restante é liberado na atmosfera, dependendo das relações entre as propriedades do solo, como temperatura, teor de água e de carbono orgânico, entre outros. O ECO<sub>2</sub> ocorre de maneira mais intensa na camada superficial do solo por haver maior presença de raízes e microorganismos sendo influenciado diretamente sob condições favoráveis de umidade e temperatura (Liu et al., 2017). O ECO<sub>2</sub> é influenciado por variáveis abióticas e bióticas, vale ressaltar que, os eventos de precipitação, umidade e temperatura no solo, podem alterar entre as estações (Zhang et al., 2015). Logo, o ECO<sub>2</sub> pode variar com as intensidades de precipitação em diferentes estações do ano. Não diferente de outras florestas tropicais sazonalmente secas, na Caatinga as baixas taxas de umidade no solo e as altas temperaturas do solo são fatores limitantes para sua respiração (Souto et al., 2013).

No que diz respeito a precipitação é o principal fenômeno responsável pela regulação de parâmetros como umidade do solo e temperatura, onde geralmente são considerados os dois principais fatores de controle, induzindo variações no efluxo CO<sub>2</sub> ao longo do ano, impactando a respiração do solo em ecossistemas terrestres (Song et al., 2016; Smith et al., 2017).

Mudanças na magnitude do ECO<sub>2</sub> podem ter uma grande influência na concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico, estimativas precisas do efluxo de diferentes ecossistemas podem ajudar a quantificar o armazenamento de carbono terrestre.

Assim, a realização de previsões para o ciclo de carbono a longo prazo e seu acoplamento com os padrões de precipitação, umidade no solo e temperatura do solo é fundamental para entender as diferenças sazonais nas respostas do efluxo de CO<sub>2</sub> (Liu et al., 2017). Geralmente, em diferentes escalas temporais, o ECO<sub>2</sub> é afetado por fatores ambientais, como temperatura e umidade do solo, que em ecossistemas sazonalmente secos, a umidade do solo exerce uma influência primordial nos processos do ecossistema (Vargas-Terminel et al., 2022). Estudos vêm sendo realizados quantificando o ECO<sub>2</sub> em vários ecossistemas e zonas climáticas do mundo (Han et al., 2019).

Apesar dos ecossistemas áridos e semiáridos abrangerem uma fração substancial da superfície terrestre (Wang et al., 2014), estes sistemas contribuem significativamente para o ciclo do carbono (Tucker e Reed, 2016). Assim, estudos sobre o ECO<sub>2</sub> nesses ecossistemas ainda são incipientes quanto comparado com outros ambientes (Shi et al., 2015; Zhang et al., 2015). Em relação à Caatinga no Semiárido brasileiro, tem-se ainda um número modesto de estudos sobre o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo (Ribeiro et al., 2016; Santos et al., 2020; Lima et al., 2020; Costa Lourenço et al., 2022; Lima et al., 2023).

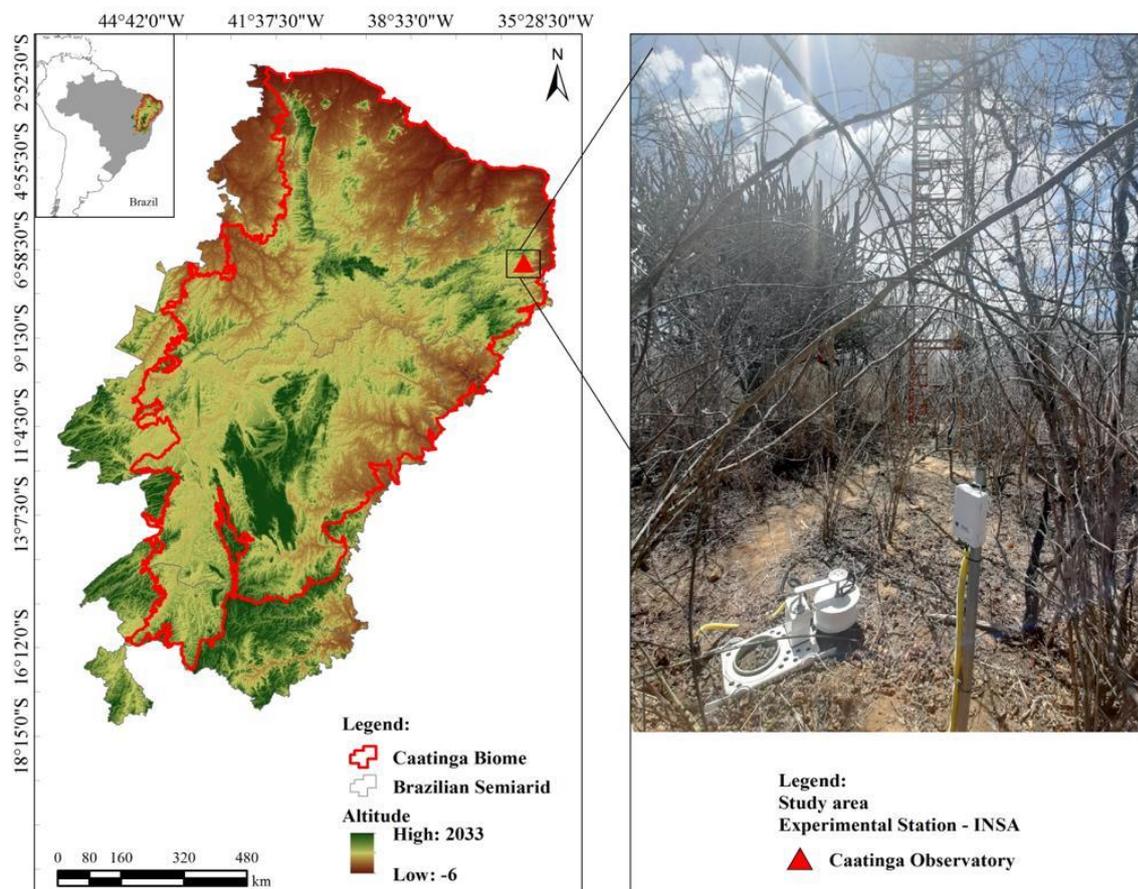
Diante disso, assim, o objetivo foi avaliar a relação de efluxo de CO<sub>2</sub> no solo com variáveis físicas em diferentes profundidades sob área de Caatinga. Considerando a seguinte hipótese: se a disponibilidade hídrica do solo é um componente modulador dos processos de sua respiração, então os períodos mais chuvosos aumentam a taxa de CO<sub>2</sub> do solo porque a água é um fator limitante nos processos ecológicos na Caatinga.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada na Estação Experimental Prof. Ignácio Salcedo do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado no município de Campina Grande-PB (Figura 1). A área está inserida na microrregião de Campina Grande, Mesorregião Agreste inserida na ecorregião do planalto da Borborema com relevo suave-ondulado. O estudo foi realizado durante os meses de agosto de 2021 a agosto de 2022, na área de Reserva Legal (RL) do INSA (7°16'47.76" S, 35°58'29.21" W). A RL possui

350 ha sendo caracterizada como vegetação florestal sub-caducifolia em estágio secundário de recuperação com aproximadamente 60 anos de idade (Figura 1). Na Figura 1 pode ser notada abaixo a localização da área de estudo.



**Figura 1.** Localização da área de estudo na Reserva Legal do INSA.

Quanto ao clima, segundo Köppen, é classificado como tropical do tipo Semiárido (Bsh) com precipitação de verão e inverno seco (Alvares et al., 2013). A estação chuvosa na região inicia em fevereiro / março e termina em julho, enquanto a estação seca é prolongada, de 4 a 5 meses, a partir de agosto e estendendo-se até dezembro (Oliveira et al., 2021).

A temperatura média e a umidade relativa são ~ 29 °C e 60%, respectivamente. A área de pesquisa apresenta vegetação típica de Caatinga hipoxerófila decídua, pluviosidade média de 550 mm, com elevação de 490 m, o solo da área é classificado como NEOSSOLO LITÓLICO com textura franco-arenosa, pouco profundo (Oliveira et al., 2021).

Foram coletadas amostras compostas na área de estudo para caracterização das propriedades físicas e de carbono orgânico do solo do local estudado em três camadas (0-5, 5-10 e 10-20 cm), cujos resultados estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Médias e desvio padrão das propriedades físicas e carbono orgânico do solo.

<b>Camada</b> cm	<b>DS</b> Mg m <sup>-3</sup>	<b>DP</b> Mg m <sup>-3</sup>	<b>PT</b> m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	<b>Areia</b> g kg <sup>-1</sup>	<b>Silte</b> g kg <sup>-1</sup>	<b>Argila</b> g kg <sup>-1</sup>	<b>COS</b> g kg <sup>-1</sup>
0-5	1,49 ±0,09	2,61±0,01	0,42±0,04	744±25,4	133±34,6	122±43,2	12,21±1,76
5-10	1,55±0,03	2,60±0,03	0,40±0,02	665±17,6	116±13,1	218±15,6	6,8±2,72
10-20	1,61±0,05	2,62±0,01	0,38±0,02	601±6	137±14,5	261±16,5	3,84±0,78

Em que: DS, é a densidade do solo, determinada pelo método do torrão parafinado; DP, é a densidade de partículas, determinada pelo método do balão volumétrico; PT, porosidade total, determinada pela relação entre DS e DP [PT = 1-(DS/DP)]; Granulometria (teores de areia, silte e argila) determinada pelo método do hidrômetro; COS, carbono orgânico do solo, determinado pelo método de Walkley e Black.

### 3.2.2 Coleta dos dados

O efluxo de CO<sub>2</sub> do solo foi medido utilizando um modelo de sistema automatizado de efluxo de CO<sub>2</sub>, do tipo IRGA (analisador de gás por infravermelho), modelo do tipo LI8150 – Multiplex (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA). Suas aferições foram realizadas diariamente durante o período de agosto de 2021 até agosto de 2022.

Para essas medições foram instalados 4 colares de PVC com diâmetro interno de 22 cm e altura de 7 cm nos locais de medição a uma profundidade de 5 cm no solo, dias anteriores ao início das medições. Utilizou-se 4 aparelhos câmaras para realização das medidas em campo. O aparelho IRGA possui um volume de câmara de retenção de gás de 4823,9 cm<sup>3</sup>, cobrindo uma área de superfície do solo de 317,8 cm<sup>2</sup>, um irradiador infravermelho e um filtro detector. O sinal infravermelho atravessa a câmara de medição, que é preenchida com o gás amostrado medido pelo detector (Ferreira et al., 2018).

Também foi analisada as variáveis de umidade, temperatura do solo e potencial mátrico por meio de placas de sensores 5TM Sensor (METER Group) e Sensor “TEROS 21”, Em60 Logger, Datalogger em três camadas de 0-05 (1), 05-10 (2) e 10-20 (3) cm.

Os sensores foram instalados em uma torre micrometeorológica na mesma área de funcionamento das câmaras do IRGA.

### 3.2.3 Análise dos dados

Os dados de  $\text{ECO}_2$ , umidade, temperatura e potencial mátrico foram processados por meio de médias diárias. A série temporal das variáveis foram realizadas por meio da avaliação descritiva da média sazonal (estação seca e chuvosa), desvio padrão e coeficiente de variação. As estações foram definidas com base nos quantis de precipitação: seca ( $< 10,8$  mm, 25%) e chuvosa ( $> 96,3$  mm, 75%).

Para avaliar a relação entre o  $\text{ECO}_2$  e as variáveis nas diferentes profundidades, utilizou-se a abordagem de seleção de modelos de acordo com o Critério de Informação de Akaike (AIC), no qual foram criados vários modelos isolados, comparados entre eles e os melhores modelos foram ranqueados sendo selecionado o de menor valor (Zou et al., 2022). Após a seleção do melhor modelo, utilizou-se a análise de regressão linear para analisar as relações de influência entre as variáveis sobre o  $\text{ECO}_2$  do solo (Lima et al., 2020). A realização de todos os procedimentos foi executada no software estatístico R versão 3.5.3.

## 3.4 RESULTADOS

### 3.4.1 Análises descritivas do efluxo de $\text{CO}_2$ e variáveis do solo

A média de  $\text{ECO}_2$  para a estação seca foi de  $0,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $4,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para estação chuvosa, tendo variação de 533%. Os coeficientes de variação (CV) do  $\text{ECO}_2$  foram maiores quando o valor médio de  $\text{ECO}_2$  diminuiu, oscilando entre 9,47% na estação úmida e 43,8% na estação seca (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estatística descritiva do  $\text{ECO}_2$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e potencial mátrico do solo (kPa) de 05-10 cm.

Variáveis	Estação Seca			Estação Chuvosa		
	Média	Desvio padrão	CV(%)	Média	Desvio padrão	CV (%)
Efluxo de $\text{CO}_2$ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	0,72	0,31	43,8	4,56	0,43	9,47
Temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ )	29,3	1,48	4,86	23,7	1,42	5,88
Umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,03	0,02	66,2	0,18	0,06	38,8
Potencial mátrico (kPa)	-1531	547,4	35,3	-255,6	564,4	2,17

N=395.

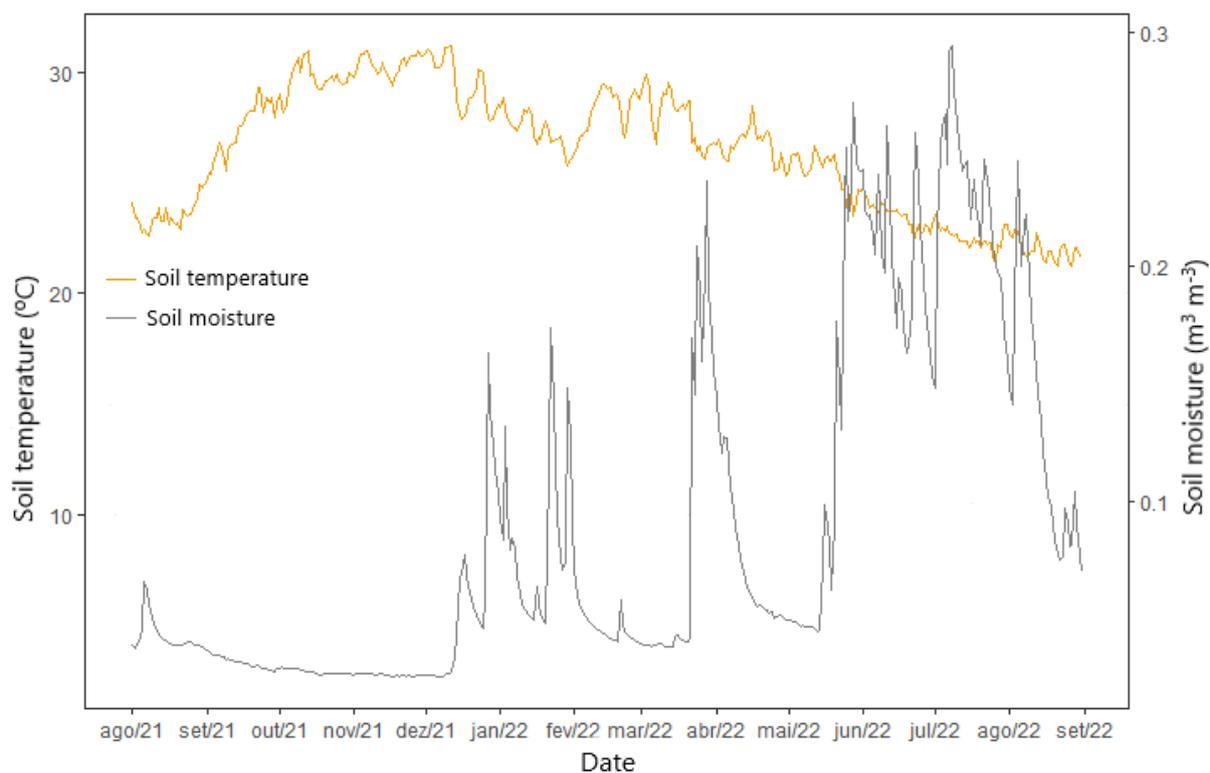
A média de temperatura do solo na estação seca foi  $29,6^{\circ}\text{C}$  e na estação chuvosa foi  $23,8^{\circ}\text{C}$  e variaram em 20%; já a umidade do solo foi  $0,03 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na estação seca e na chuvosa foi de  $0,18 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e teve variação de 67%. O potencial mátrico ( $\psi_m$ ) na estação seca foi  $-1542 \text{kPa}$  e na estação chuvosa foi  $-258,6 \text{kPa}$  variando 86%.

O coeficiente de variação para temperatura do solo foi entre 4,86% (estação seca) a 5,88% (estação chuvosa), umidade do solo variaram de 66,2% (estação seca) à 38,8% (estação úmida) e potencial mátrico de 35,3 a 2,17%, período seco e chuvoso, respectivamente (Tabela 2).

### 3.4.2 Variabilidade sazonal entre o efluxo de $\text{CO}_2$ , umidade e temperatura do solo

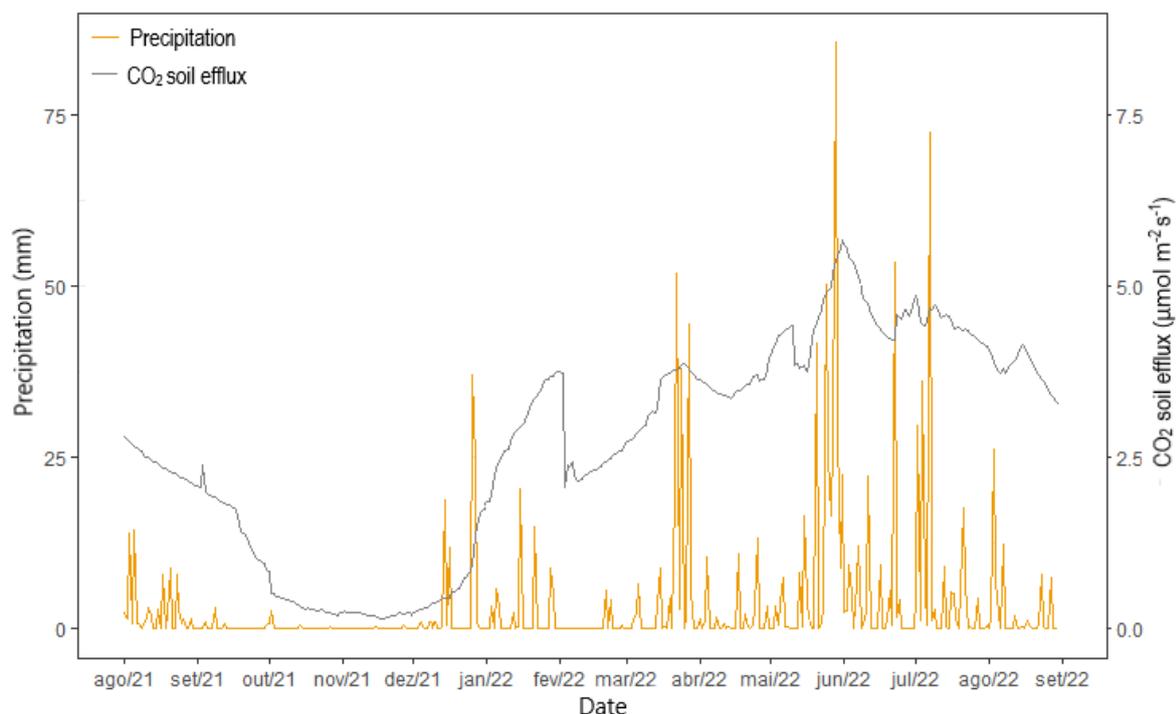
Todos os resultados seguintes descritos abaixo, referem-se ao efluxo de  $\text{CO}_2$  em função somente das variáveis de umidade e temperatura do solo na profundidade de 05-10 cm de acordo com a seleção do melhor modelo estatístico.

De acordo com a figura abaixo, são apresentadas as séries temporais das variáveis da temperatura do solo e umidade do solo. No geral, as variáveis se mantiveram com tendências inversamente proporcionais, à medida que a umidade do solo aumentou, a temperatura do solo diminuiu (Figura 2).



**Figura 2.** Série temporal de umidade no solo (soil moisture) e temperatura do solo (soil temperature) na camada de 05-10 cm na área de estudo na Reserva Legal do INSA.

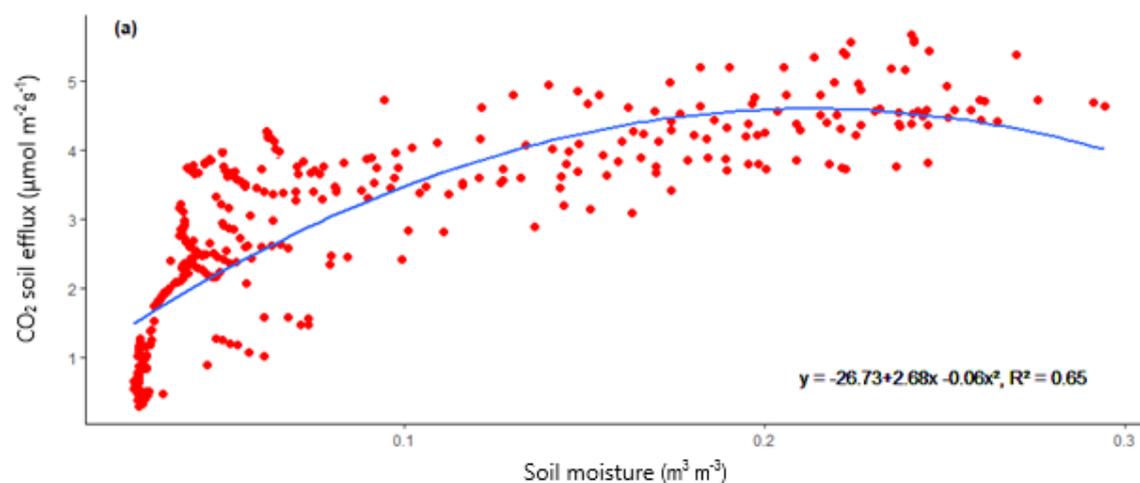
O efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{ECO}_2$ ) apresentou um claro padrão sazonal, com as menores taxas ocorrendo durante a estação seca e as maiores durante a estação chuvosa (Figura 3). A precipitação acumulada na estação seca foi de apenas 39,3 mm e na estação chuvosa foi de 930,4 mm. Os valores mensais maiores de precipitação foram registrados em julho de 2022 sendo superiores a 300 mm.

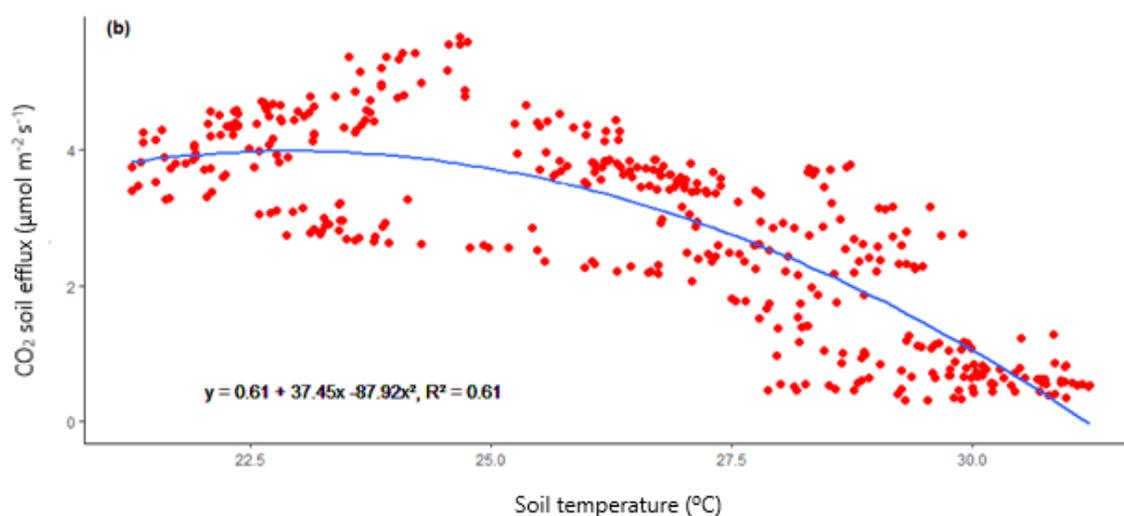


**Figura 3.** Série temporal do efluxo de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> soil efflux) e precipitação (precipitation) da área de estudo na Reserva Legal do INSA.

### 3.4.3 Relação entre efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo

Para a análise de regressão linear na figura 4, houve relações significativas entre o ECO<sub>2</sub> e umidade ( $R^2 = 0,65$ ) e para a variável de temperatura no solo ( $R^2 = 0,61$ ).





**Figura 4.** Resposta do efluxo de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> soil efflux) à (a) umidade do solo (soil moisture) e (b) temperatura do solo (soil temperature) na camada de 05-10 cm.

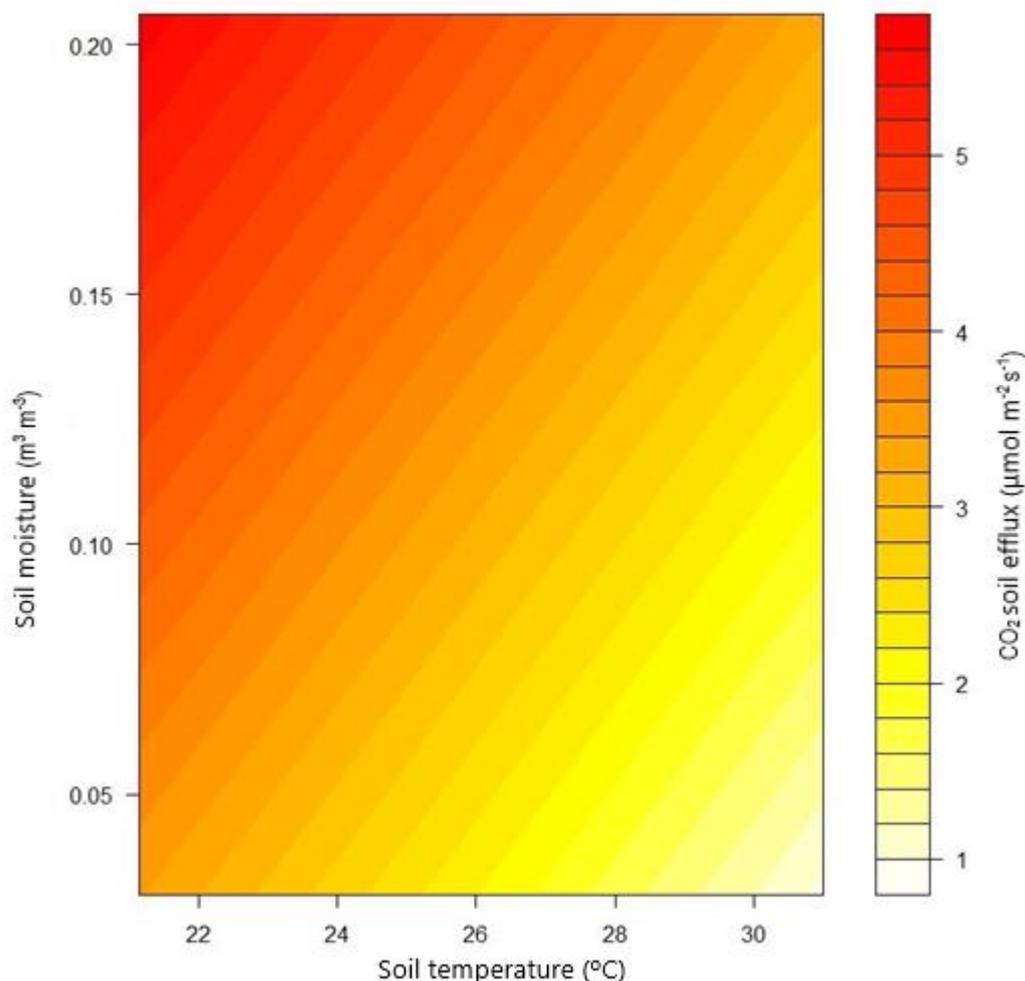
Abaixo na tabela 3, estão descritos os valores de desempenho da seleção do modelo estatístico AIC.

**Tabela 3.** Desempenho do modelo estatístico para umidade e temperatura do solo.

	Estimativa	Desvio médio	T. valor	AIC
Interceptação	8,22769	0,62107	13,25***	
Temperatura do solo	-0,24747	0,02146	-11,53***	983,47
Umidade do solo	13.02380	1,16159	-11,21***	

Significância: \*\*\* 0,001

De acordo com a figura 5, abaixo, os maiores valores do efluxo de CO<sub>2</sub> foram no período de maior teor de umidade no solo e menor temperatura do solo indicada pelas cores do gráfico de superfície tridimensional.



**Figura 5.** Gráfico de superfície da relação entre efluxo de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> soil efflux) umidade do solo (soil moisture) e temperatura do solo (soil temperature) na camada de 05-10 cm. Cores mais intensas indicam maior valor de ECO<sub>2</sub>.

### 3.5 DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Variabilidade sazonal do efluxo de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo

O efluxo de CO<sub>2</sub>, no geral, seguiu o padrão sazonal de precipitação, esta relação já era esperada por haver uma forte dependência da umidade do solo para que ocorra maior atividade microbiana e a respiração do solo (Lima et al., 2020). O início da coleta dos dados foi no fim da estação chuvosa, (agosto/2021), após isso, passou-se o processo da estação seca por aproximadamente 3 meses seguintes. A transição do fim da estação seca para o início da estação chuvosa ocorreu nos primeiros meses do ano de 2022 e por fim a coleta de dados foi concluída no processo inicial de fim da estação chuvosa para a estação seca (agosto/2021). Vale ressaltar

que este ano na área de estudo durante o intervalo de realização deste trabalho, a estação chuvosa obteve precipitação acima da média de anos anteriores (Costa Lourenço et al., 2022).

Durante a estação chuvosa, o solo obteve maior umidade e menor temperatura no solo (Figura 2). A umidade do solo e a temperatura do solo são citados na literatura, como um dos principais fatores que influenciam a variabilidade temporal do  $\text{ECO}_2$  do solo em florestas tropicais sazonalmente secas (Adachi et al., 2009; Leon et al., 2014; Rubio e Detto, 2017). No ambiente estudado a umidade e temperatura do solo tiveram praticamente o mesmo fator controlador da variabilidade temporal do  $\text{ECO}_2$  do solo.

Os resultados dos valores demonstraram que o efluxo variou sazonalmente apontando estar relacionado com a umidade do solo e conseqüentemente com a precipitação (Figura 2). Este processo ocorreu por conta que a estação chuvosa favoreceu maior atividade metabólica aos microrganismos no solo, ao passo que durante a estação seca por conta da limitação hídrica houve diminuição da atividade microbiana (Ferreira et al., 2018; Costa Lourenço et al., 2022).

Logo, quando as condições favoráveis de umidade do solo diminuem, o efluxo de  $\text{CO}_2$  do solo também diminui (Acosta et al., 2017). Resultados semelhantes foram relatados por Leon et al. (2014) e por Fóti et al. (2014) estudando mudanças induzidas pela umidade do solo no efluxo do solo em regiões semiáridas com florestas sazonalmente secas. Em florestas secas, a umidade do solo é condicionada pelas chuvas, o que em grande parte causa uma relação positiva entre a precipitação e a respiração do solo (Lima et al., 2020).

Segundo Souto et al. (2013), na floresta tropical sazonalmente seca de Caatinga, o ciclo de umedecimento/secagem do solo é bastante rápido, influenciando diretamente a atividade e proliferação de microrganismos. O pulso do efluxo do solo, geralmente ocorre rapidamente após o umedecimento devido à infiltração da água da chuva, que pode deslocar o  $\text{CO}_2$  que se acumulou nos espaços porosos do solo durante a estação seca (Liu et al., 2019). Valores altos de temperatura limitam a atividade microbiana em solos em ambientes florestais tropicais sazonalmente secos (Correia et al., 2015; Holanda et al., 2015; Ferreira et al., 2018; Lima et al., 2020).

### **3.5.2 Relação do efluxo de $\text{CO}_2$ , umidade e temperatura do solo**

Sobre o efluxo de CO<sub>2</sub>, ter obtido maior relação com o modelo das variáveis de umidade e temperatura na profundidade de 05-10 cm, possivelmente ocorreu por conta de estar mais abaixo da superfície do solo onde ao receber menor radiação, mantendo a umidade do solo por maior tempo. A maior relação de CO<sub>2</sub> com a umidade no solo, se deu por conta que a mesma é a principal componente que afeta a variabilidade do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo em regiões de florestas secas, onde a umidade do solo é um fator limitante (Han et al., 2019). Em um estudo, Holanda et al. (2015), utilizando modelo de regressão linear obteve relação entre a umidade do solo e o efluxo de CO<sub>2</sub> em um remanescente de floresta tropical sazonalmente seca no sertão paraibano.

A relação negativa entre o efluxo de CO<sub>2</sub> e a temperatura do solo ocorreu em virtude que quanto maior a temperatura do solo, ocorre maior perda de umidade pela evaporação, no qual inibe a respiração do solo, principalmente nas camadas mais superficiais do solo onde é recebida maior calor latente por meio dos raios solares. Ribeiro et al. (2016) obteve resultados semelhantes ( $R^2= 0,70$ ) obtendo também relação negativa entre efluxo de CO<sub>2</sub> e temperatura do solo na Caatinga no Nordeste do Brasil. Em uma floresta tropical sazonalmente seca no estado de Pernambuco, Lima et al. (2020) e Lima et al. (2023) obtiveram relação positiva entre o efluxo de CO<sub>2</sub> e umidade do solo e negativa com a temperatura do solo.

Em outras regiões secas, Zhang et al. (2015) obteve explicação significativa inerente à relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> com a umidade e temperatura do solo no semiárido chinês. Por meio de um modelo de regressão, Tucker et al. (2016) obtiveram relação entre o efluxo de CO<sub>2</sub> no solo com umidade e temperatura no solo no semiárido norte-americano. O efluxo de CO<sub>2</sub> possui íntima relação com a variabilidade climática, bem como a temperatura e a pluviosidade.

A dispersão dos dados ocorreu por haver alta variabilidade de chuvas nesse ambiente, o que é uma característica marcante. De acordo Souto et al. (2013), no ambiente de Caatinga o ciclo secagem/umedecimento do solo podem ser bastante rápidos, questão de poucos dias o que pode implicar maior ou menor atividade e proliferação de organismos. Além disso, na superfície do solo a temperatura tem um papel chave em relação a população microbiana e intensidade de decomposição dos resíduos orgânicos (Holanda et al., 2015).

A relação tridimensional das variáveis da figura 5, aponta que o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo seguiu a tendência em função do aumento da umidade no solo, de maneira

que por ser de textura franco-arenosa e ser relativamente drenado, não houve limitações em função da saturação hídrica no solo.

### 3.5.3 Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo

Sobre o efluxo médio de CO<sub>2</sub> do solo na RL do INSA, durante o período analisado o efluxo foi de 10,5 toneladas por hectare/ano. Este valor foi maior do que o dos estudos na Caatinga do sertão de Pernambuco, analisados por Ribeiro et al. (2016), Ferreira et al. (2018) e Lima et al. (2020), com 6,1; 8,6 e 8,0 toneladas por hectare/ano, respectivamente (Tabela 4). No semiárido chinês Shi et al. (2014), estudando o ECO<sub>2</sub> sob diferentes usos da terra obteve em área de floresta seca arbustiva 10,1 toneladas por hectare/ano.

**Tabela 4.** Visão geral dos valores anuais do efluxo de CO<sub>2</sub> no solo para vários ecossistemas de floresta sazonalmente seca.

<b>Ecossistema</b>	<b>ECO<sub>2</sub></b> (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	<b>Local</b>	<b>Referência</b>
Caatinga	10,5	Brasil-PB	Esta pesquisa
Caatinga	6,1	Brasil-PE	Ribeiro et al. (2016)
Caatinga	8,6	Brasil-PE	Ferreira et al. (2018)
Caatinga	8,1	Brasil-PE	Lima et al. (2020)
Floresta seca	10,1	China	Shi et al. (2015)
Floresta seca	8,4	Espanha	Asensio et al. (2007)

De modo geral, os valores de ECO<sub>2</sub> na Caatinga podem ser vistos como indicadores de boa qualidade ambiental devido aos altos níveis de carbono orgânico no solo. Em um Ecossistema florestal seco da Espanha, Oyonarte et al. (2012), avaliando o uso do ECO<sub>2</sub> como indicador do funcionamento do ambiente, constataram que quanto maior o ECO<sub>2</sub> do solo o efluxo é interpretado como uma melhoria no estado do ecossistema.

Assim, as emissões de CO<sub>2</sub> do solo no semiárido brasileiro são semelhantes às de outras áreas semiáridas do mundo e variam em função do teor de carbono orgânico do solo, temperatura do solo e umidade do solo (Lima et al., 2020). Para estudos futuros, além das variáveis analisadas deve-se considerar inclusão de novas variáveis como área basal do solo, índice de área foliar e biomassa radicular,

biomassa microbiana e nutrientes, topografia, frações da matéria orgânica do solo, entre outras (Santos et al., 2020).

### 3.6 CONCLUSÕES

A respiração do solo foi afetada pela sazonalidade pluviométrica tendo seu pico de emissão de efluxo de CO<sub>2</sub> atingido durante a estação chuvosa. O modelo utilizado neste estudo revelou que a variabilidade do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo tem como principal fator controlador a umidade e temperatura na camada de 05-10 cm.

Nossos achados contribuem para o maior entendimento da variabilidade e efeito das variáveis físicas no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em florestas sazonalmente secas do tipo Caatinga, ainda escassas na literatura.

## 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. <https://doi.org/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*, v. 25, p. 531-539, <https://doi.org/10.1017/S026646740999006X>
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Asensio D, Peñuelas J, Llusà J, Ogaya R, Filella I. (2007). Interannual and inter seasonal soil CO<sub>2</sub> efflux and VOC exchange rates in a Mediterranean holm oak forest in response to experimental drought. *Soil Biol Biochem*.39:2471-84. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.04.019>
- Correia, K.G., Araújo Filho, R.N., Menezes, R.S.C., Souto, J.S., Fernandes, P.D. (2015). Atividade microbiana e matéria orgânica leve em áreas de diferentes estágios sucessionais no semiárido Paraibano. *Revista Caatinga*. 28:196-202.
- Costa Lourenço, E.R., Souza, B.I., D'Andrea, A.F., Souza, J.J.L.L. (2022). Temporal variation of soil CO<sub>2</sub> emission in different land uses in the Caatinga. *Applied Geography*. 140-102661. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102661>
- 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.S.C. (2018). Soil CO<sub>2</sub> efflux measurements by alkali absorption and infrared gas analyzer in the Brazilian semiarid region. *Rev Bras Cienc Solo*. 42:0160563. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160563>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.009>
- Han, C., Yu, R., Lu, X., Duan, L., Singh, V.P., Liu, T. (2019). Interactive effects of hydrological conditions on soil respiration in China's Horqin sandy land: An example of dune-meadow cascade ecosystem. *Sci Total Environ*. 651:3053-63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.198>
- Holanda, A.C., Feliciano, A.L.P., Marangon, L.C., Freire, F.J., Holanda, E.M. (2015). Decomposição da serrapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. *Revista Árvore*, v.39, n.2, p.245-254. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000200004>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.029>
- Lima, J. R. S., et al. (2023). Moisture, temperature and respiration of two soil classes under pasture and tropical dry forest in the semiarid Brazilian region. *Journal of Arid Environments*. 214, 104-981. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104981>
- 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. *Rev Bras Cienc Solo*. 44:0200092. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200092>
- Liu, Z., Zhang, Y., Fa, K., Qin, S., She, W. (2017). Rainfall pulses modify soil carbon emission in a semiarid desert. *Catena*. 155, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.011>
- Liu, Y., Liu, S., Miao, R., Liu, Y., Wang, D., Zhao, C. (2019) Seasonal variations in the response of soil CO<sub>2</sub> efflux to precipitation pulse under mild drought in a temperate oak (*Quercus variabilis*) forest. *Agr Forest Meteorol*. 271, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.009>
- Oliveira, M.L., Santos, C.A.C., Oliveira, G., Perez-Marin, A.M., Santos, C.A.G. (2021). Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>
- 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. *Ecol Indic*. 14:40-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.013>
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Brazil. Available in: <<https://www.R-project.org>> (Accessed on June 10, 2022).
- Ribeiro, K., Sousa-Neto, E.R., Carvalho, J.A., Lima, J.R.S., Menezes, R.S.C., Duarte-Neto, P.J., Guerra, G.S., Ometto, J.P.H.B. (2016). Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. *Sci Total Environ*. 571:1048-57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>
- Rubio, V.E., Detto, M. (2017). Spatiotemporal variability of soil respiration in a seasonal tropical forest. *Ecology Evolution*. 7, 7104-7116. <http://doi.org/10.1002/ece3.3267>
- Santos, É.M.C., Araujo, K.D., Souza, M.A., Gomes, D.L., Lira, E.S., Júnior, S.A.M.G., Costa, J.G. (2020). Relief and edaphoclimatic conditions as influencing agents of CO<sub>2</sub> release in Alagoas Caatinga, Brazil. *Soil Research*. 58(3) 306-313. <https://doi.org/10.1071/SR19156>

- Shi, W-Y, Yan M-J, Zhang J-G, Jin-Hong Guan J-H, Du S. (2014). Soil CO<sub>2</sub> emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atmos Environ.*;88:74-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.066>
- Shi, Z., Zhang, Y., Chen, B., Zhou, W., Du, E., Fang, J. (2015). Comparison of the Variation of Soil Respiration in Carbon Cycle in Temperate and Subtropical Forests and the Relationship with Climatic Variables. *Polish J. Ecol.* 63, 365–376. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2015.63.3.007>
- Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Alves, E.M. (2017). Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *J Arid Environ.* 147:71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- Smith, A.P., Bond-Lamberty, B., Benscoter, B.W., Tfaily, M.M., Hinkle, C.R., Liu, C., Bailey, V.L. (2017). Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. *Nat. Commun.* 8, 1335. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01320-x>
- Song, B., Niu, S. Wan, S., (2016). Precipitation regulates plant gas exchange and its long term response to climate change in a temperate grassland. *J. Plant Ecol.* 9, 531–541. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw010>
- Souto, P.C., Souto, J.S., Santos, R.V., Bakke, I.A., Sales, F.C.V., Souza, B.V. (2013). Taxa de decomposição da serapilheira e atividade microbiana em área de Caatinga. *Cerne.* 19, 559–565. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000400005>
- 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 <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0200-1>
- Vargas-Terminel, M.L., Flores-Rentería, D., Sánchez-Mejía, Z.M., Rojas-Robles, N.E.; Sandoval-Aguilar, M., Chávez-Vergara, B.; Robles-Morua, A., Garatuza-Payan, J., Yépez, E.A. (2022). Soil Respiration Is Influenced by Seasonality, Forest Succession and Contrasting Biophysical Controls in a Tropical Dry Forest in Northwestern Mexico. *Soil Syst.* 6, 75. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040075>
- Wang, B., Zha, T.S., Jia, X., Wu, B., Zhang, Y.Q., Qin, S.G. (2014). Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem. *Biogeosciences.* 11:259-68. <https://doi.org/10.5194/bg-11-259-2014>
- Zou, H.; Chen, J.; Shao, C.; Dong, G.; Duan, M.; Zhu, Q.; Li, X. (2022). Model Selection for Ecosystem Respiration Needs to Be Site Specific: Lessons from Grasslands on the Mongolian Plateau. *Land.* 11, 87. <https://doi.org/10.3390/land11010087>

## SEÇÃO IV - IMPACTOS DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS NO FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM UMA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA

### RESUMO

A Caatinga é uma das principais Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) mundialmente e possui grande potencial de produtividade em seu ecossistema. Contudo, ainda existem incertezas de como o fluxo de CO<sub>2</sub> pode ser afetado pelas variáveis biofísicas na Caatinga frente às mudanças climáticas. O objetivo foi avaliar a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> e suas relações com variáveis biofísicas em uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca. Com a hipótese: se as variáveis biofísicas determinam o fluxo do CO<sub>2</sub> na caatinga, então as condições climáticas definem a dinâmica de CO<sub>2</sub>, porque o clima regula os processos de produtividade e respiração do ecossistema. Este estudo foi desenvolvido utilizando medidas de Eddy Covariance em uma torre micrometeorológica e sensoriamento remoto durante os anos de 2021 e 2022 numa FTSS em domínio de Caatinga no Semiárido brasileiro. As variáveis analisadas foram: índice de vegetação melhorada (EVI), radiação global, calor sensível, temperatura do ar e do solo, déficit de pressão de vapor, umidade relativa, evapotranspiração, eficiência no uso de água, respiração do ecossistema ( $R_{eco}$ ), produtividade primária bruta (GPP) e troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE). Os dados foram processados por meio de análise diária das médias dos componentes do fluxo de CO<sub>2</sub> e demais variáveis em intervalos sazonais, análise de regressão e modelagem de equações estruturais. Os resultados mostraram que o comportamento dos componentes dos fluxos de CO<sub>2</sub> variaram em função da magnitude e distribuição das chuvas. Os valores de EVI acompanharam as ocorrências de chuva, tendo seu valor máximo na estação chuvosa. Mesmo na estação seca a produtividade primária bruta se manteve com valores moderados e obteve seu pico na estação chuvosa. A respiração do ecossistema foi máxima nos meses chuvosos e mínima durante os meses secos devido à baixa umidade no solo. Mesmo durante a estação seca, o NEE esteve em equilíbrio e a Caatinga funcionou como um sumidouro atmosférico de CO<sub>2</sub> durante o período de estudo. As maiores explicações para as variáveis de acordo com o modelo de equações estruturais foram troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema, respiração do ecossistema, temperatura do solo, calor sensível e uso eficiente da água. As maiores relações de NEE foram com GPP negativamente e  $R_{eco}$  positivamente.

**Palavras-Chave:** particionamento de CO<sub>2</sub>; produtividade do ecossistema; fluxo de água; análise multivariada; caatinga.

## SECTION IV - IMPACTS OF BIOPHYSICAL VARIABLES ON CO<sub>2</sub> FLOW IN A SEASONALLY DRY TROPICAL FOREST

### ABSTRACT

The Caatinga is one of the main Tropical Seasonally Dry Forests (FTSS) in the world and has great productivity potential in its ecosystem. However, there are still interferences in how the CO<sub>2</sub> flux is affected by biophysical variables in the Caatinga in the face of climate change. The objective was to evaluate the impacts of biophysical variables on the CO<sub>2</sub> flux in a Seasonally Dry Tropical Forest. With the hypothesis: if the biophysical variables determine the flow of CO<sub>2</sub> in the caatinga, then the climatic conditions define the flow of CO<sub>2</sub>, because the climate regulates the production processes and the ecosystem. This study was developed using Eddy Covariance (EC) measurements in a micrometeorological tower and remote sensing during the years 2021 and 2022 in a FTSS in the Caatinga domain in the Brazilian semi-arid region. The influenced variables were: global radiation, heat sensitivity, air and soil temperature, vapor pressure deficit, relative humidity, evapotranspiration, efficient water use, ecosystem flow, ecosystem production and net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange. Data were processed through daily analysis of mean CO<sub>2</sub> flux components and biophysical variables at seasonal intervals, regression analysis and modeling of lost relatives. The results showed that the behavior of the CO<sub>2</sub> flux components varied according to the magnitude and distribution of rainfall. The EVI values follow the occurrences of rain, having its maximum value in the rainy season. Even in the dry season, gross primary productivity remained at moderate values and reached its peak in the rainy season. Ecosystem physiology was maximum in the rainy months and minimum during the dry months due to low soil moisture. Even during the dry season, the NEE remained in equilibrium and the Caatinga acted as an atmospheric CO<sub>2</sub> sink during the study period. The highest emotions for the variables according to the sadness model were net CO<sub>2</sub> exchange of the ecosystem, ecosystem vegetables, soil temperature, sensible heat and efficient use of water. The highest SEN relationships were with admission GPP and Reco positively.

**Key-Words:** CO<sub>2</sub> partitioning; ecosystem productivity; water flux; multivariate analysis; caatinga.

## 4.1 INTRODUÇÃO

Globalmente, as florestas tropicais sazonalmente secas (FTSS) são consideradas um importante ponto de biodiversidade, endemismo e uma fonte fundamental de bens e serviços ecossistêmicos, implicando em alta produtividade e taxas de armazenamento de Carbono (Liu et al., 2017). Em relação aos fluxos do dióxido de carbono ( $\text{FCO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) esses ecossistemas no sistema solo-planta-atmosfera são considerados importantes contribuintes responsáveis pela absorção e estocagem (Yao et al., 2020). As FTSS são amplamente consideradas como tendo um grande potencial para atuar como sumidouros de  $\text{CO}_2$  atmosférico, desempenhando um importante papel na mitigação das mudanças climáticas (Jia et al., 2018). Em específico, na região semiárida do Brasil, a Caatinga é considerada um bioma exclusivamente brasileiro e a mesma é reconhecida como um tipo de FTSS (Villarreal et al., 2021).

Desse modo, esses ecossistemas apresentam condições ambientais particulares como chuvas baixas e irregulares, altas temperaturas e radiação solar incidente que aumentam a evapotranspiração do ecossistema, levando a maiores déficits hídricos para a maior parte do ano (Mendes et al., 2021). A Caatinga caracteriza-se por ser um mosaico de espécies xerófitas e endêmicas com florística variável, composta principalmente por árvores, arbustos e cactáceas (Souza et al., 2017). As plantas possuem cutículas altamente impermeáveis, raízes tuberosas, caules suculentos que apresentam folhas pequenas e decíduas como mecanismo de redução da perda de água adaptada ao clima local na estação seca (Marques et al., 2020).

Vários estudos têm evidenciado o potencial de diferentes tipos de ecossistemas para sequestrar carbono em resposta ao aumento de  $\text{CO}_2$  atmosférico associado ao clima por alterar ou liberar  $\text{CO}_2$  (Mendes et al., 2020). A Caatinga possui um alto potencial de sequestro de carbono devido à alta atividade fotossintética quando a água está disponível (Silva et al., 2021). A importância da Caatinga para o clima regional e global é, portanto, inquestionável, mas sua vulnerabilidade à seca e os riscos associados aos impactos de variáveis biofísicas nesta floresta é incerta, devido ainda aos poucos estudos nesta região (Koch et al., 2016).

Neste sentido, quantificar os fluxos envolvendo carbono e as trocas de água permitem uma melhor compreensão sobre suas dinâmicas e da sobrevivência das

plantas (Eamus et al., 2013; Silva et al., 2017). Assim, a técnica de Eddy Covariance (EC) tem sido amplamente utilizada para monitorar o comportamento sazonal observado e determinar as trocas dos fluxos de massa e calor na interface solo-vegetação-atmosfera (Araújo et al., 2010; Oliveira et al., 2023). É fundamental avaliar se um determinado ecossistema está atuando como fonte ou sumidouro de CO<sub>2</sub> atmosférico. As medições de fluxo também podem fornecer dados para a avaliação de modelos climáticos dinâmicos (Silva et al., 2021).

Essas trocas são controladas por diferentes variáveis biofísicas, como temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, radiação solar e umidade do solo, além de processos biológicos da vegetação (por exemplo, fases fenológicas e condutância estomática) (Zha et al., 2013). Quantificar os fluxos de CO<sub>2</sub> e água permitem uma melhor compreensão dos serviços ecossistêmicos que estão sendo realizados pela própria sobrevivência das plantas (Marques et al., 2020).

Devido às recentes informações ainda sobre o tema em FTSS no semiárido brasileiro, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> e suas relações com variáveis biofísicas em uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca. Considerando a seguinte hipótese: se as variáveis biofísicas determinam a dinâmica do CO<sub>2</sub> na caatinga, então as condições climáticas definem a dinâmica de CO<sub>2</sub>, porque o clima regula os processos de produtividade e respiração do ecossistema.

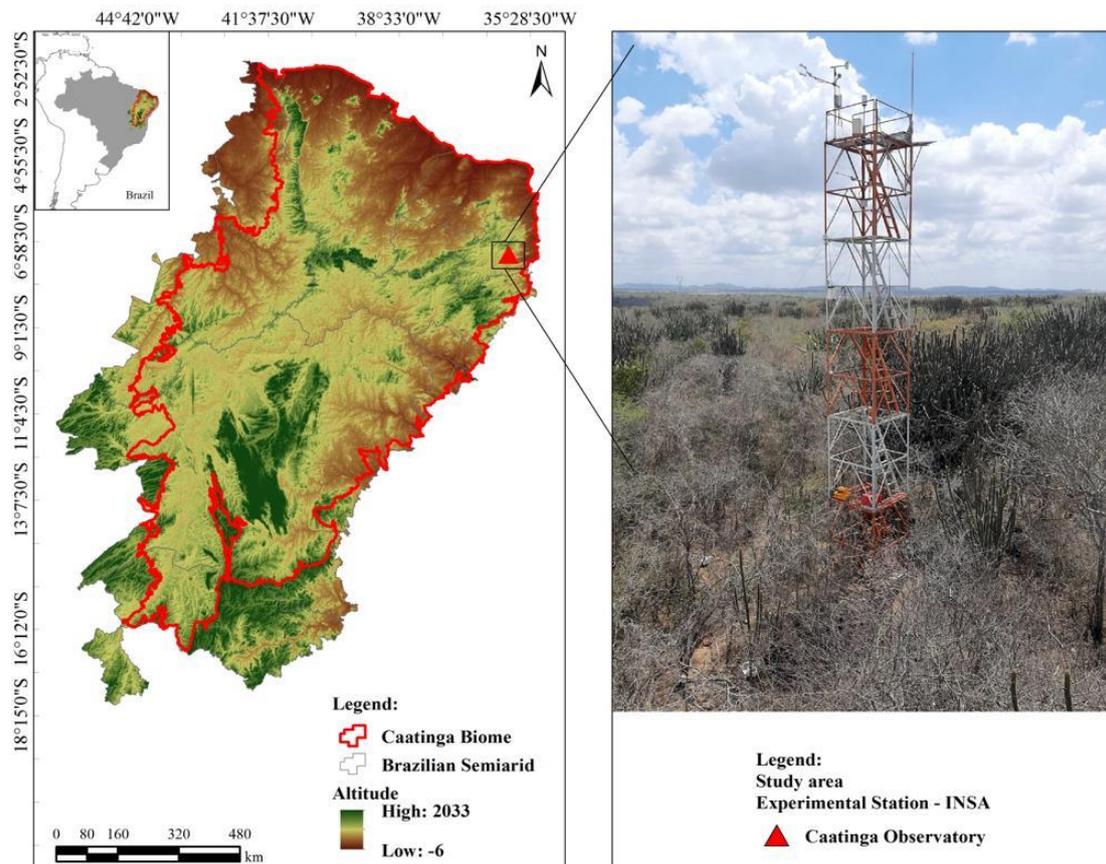
## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada na Estação Experimental Prof. Ignácio Salcedo do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado no município de Campina Grande-PB. Apresenta vegetação típica de Caatinga hiperxerófila decídua (Figura 6), pluviosidade média de 650 mm, o solo da área é classificado como NEOSSOLO LITÓLICO com textura franco-arenosa, pouco profundo e pedregoso (Borges et al., 2020).

A elevação da área é de 490 m, pertence à microrregião de Campina Grande, Mesorregião Agreste e possui clima do tipo Semiárido (BSh). A temperatura média e a umidade relativa são ~ 29 °C e 60%, respectivamente. A estação chuvosa na região

inicia em fevereiro / março e termina em julho, enquanto a estação seca é prolongada, de 5 a 6 meses, a partir de agosto e estendendo-se até janeiro (Oliveira et al., 2021).



**Figura 6.** Localização da área de estudo na Reserva Legal do INSA.

Foi instalada uma torre micrometeorológica de 15 m da superfície na Área de Reserva Legal (RL) do INSA ( $7^{\circ}16'47.76''$  S,  $35^{\circ}58'29.21''$  W), com 350 ha sendo caracterizada como vegetação florestal em estágio secundário com aproximadamente 60 anos de idade.

Foi realizado um levantamento florístico das espécies amostradas na área de estudo para obtenção das espécies, nome popular, família, hábito de crescimento, frequência relativa (RtF,%) e valor de importância (IV), de acordo com a tabela 1.

**Tabela 5.** Espécies, nome popular, família, hábito de crescimento, Frequência Relativa (FR) e Valor de Importância (VI) da Reserva Legal do Instituto Nacional do Semiárido.

Espécie	Nome popular	Família	Hábito	FR (%)	VI (%)
<i>Cenostigma nordestinum</i> G. & G.P.Lewis	Catingueira	Fabaceae	Árvore	13,24	23,36
<i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	Jurema de embira	Fabaceae	Árvore	8,11	14,06
<i>Combretum monetaria</i> Mart.	Mofumbo	Combretaceae	Arbusto	7,03	8,73
<i>Croton blanchetianus</i> Baill.	Marmeleiro	Euphorbiaceae	Arbusto	8,65	6,68
<i>Manihot glaziovii</i> Müll.Arg.	Maniçoba	Euphorbiaceae	Árvore	8,38	5,83
<i>Chloroleucon dumosum</i> (Benth.) G.P.Lewis	Jurema branca	Fabaceae	Árvore	4,05	5,57
<i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J. Presl	Feijão bravo	Capparaceae	Arbusto	5,95	4,64
<i>Cereus jamacaru</i> DC.	Mandacará	Cactaceae	Árvore	2,70	3,55
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	Pereiro	Apocynaceae	Árvore	4,05	2,86
<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	Acácia, esponjeira	Fabaceae	Árvore	3,51	2,79
<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong). Steud.	Mororó	Fabaceae	Árvore	3,78	2,39
<i>Guapira laxa</i> (Netto) Furlan	João mole	Nyctaginaceae	Arbusto	2,16	1,42
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B.	Imburana de cambão	Burseraceae	Árvore	1,62	1,22
<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill	Pinhão bravo	Euphorbiaceae	Arbusto	2,43	1,18
<i>Neocalyptocalyx longifolium</i> (Pohl) Baill.	Icó	Capparaceae	Arbusto	1,35	1,03
<i>Pilosocereus pachycladus</i> . Ritter	Facheiro	Cactaceae	Árvore	1,08	0,99
<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	Baraúna	Anacardiaceae	Árvore	1,08	0,75
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	Burra leiteira	Euphorbiaceae	Árvore	1,08	0,53
<i>Pseudobombax marginatum</i> (A.St.-Hil., A.)	Imbiratanha	Malvaceae	Arbusto	1,08	0,52
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Angico	Fabaceae	Árvore	0,81	0,47
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.)	Ipê roxo	Bignoniaceae	Árvore	0,94	0,50
<i>Astronium urundeuva</i> (Allemão) Engl.	Aroeira	Anacardiaceae	Árvore	0,81	0,35
<i>Spondias tuberosa</i> Arruda	Umbuzeiro	Anacardiaceae	Árvore	0,64	0,26

#### 4.2.2 Variáveis Analisadas

As variáveis biofísicas que foram observadas na torre micrometeorológica do INSA durante o período experimental, foram:

**Tabela 6.** Variáveis analisadas neste trabalho.

Variável	Descrição	Unidade
Rg	Radiação global	Wm <sup>-2</sup>
Rh	Umidade relativa	%
VPD	Déficit de pressão de vapor	kPa
H	Calor sensível	Wm <sup>-2</sup>
Tair	Temperatura do ar	°C
Tsoil	Temperatura do solo	°C

ET	Evapotranspiração	mm
WUE	Uso eficiente de água	g C kg <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O
R <sub>eco</sub>	Respiração do ecossistema	g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>
GPP	Produtividade primária bruta	g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>
NEE	Troca líquida de CO <sub>2</sub> do ecossistema	g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>

#### 4.2.3 Instrumentação e medições

O conjunto de instrumentos utilizado consistiu em um sistema de Eddy Covariance (EC) instalado em uma torre micrometeorológica com 15m de altura. As medições foram realizadas durante o período de abril de 2021 até dezembro de 2022, obtendo dados de alta frequência (10 Hz) e baixa frequência (5s) (Oliveira et al., 2021). Os dados de alta frequência consistem em medições de concentração de vapor de água e CO<sub>2</sub> e os três componentes da velocidade do vento ( $U_y$ ,  $U_z$ ,  $U_x$ ), usando um analisador de gás de caminho aberto integrado em um anemômetro sônico 3D (IRGASON, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA).

A pressão atmosférica foi medida por um Barômetro avançado PTB110 (Vaisala Corporation, Helsinki, Finlândia). Todos os dados de alta frequência foram armazenados em um cartão de memória acoplado a um data logger modelo CR3000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). Os dados de baixa frequência consistem em temperatura do solo (T<sub>soil</sub>), temperatura do ar (T<sub>air</sub>) e umidade relativa (RH), além da precipitação.

A Temperatura do ar (T<sub>air</sub>) e os dados de Umidade Relativa (RH) foram medidos usando um modelo de sonda de temperatura e umidade HMP45C (Vaisala Corporation, Helsinki, Finland). A T<sub>soil</sub> foi medida por placas de calor, HFP01SC (Hukseflux Thermal Sensors, Delft, The Netherlands) e 108 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) instaladas ambas na profundidade de 10 cm. A precipitação foi medida por um pluviômetro TB4 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA).

## 4.2.4 Processamento dos dados

### 4.2.4.1 Troca líquida do ecossistema

A troca líquida do ecossistema (NEE) é a soma do fluxo turbulento de CO<sub>2</sub> (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>), medido através da covariância entre flutuações na velocidade vertical do vento (*w'*), densidade de CO<sub>2</sub> (*c'*) e a mudança de armazenamento de CO<sub>2</sub> na coluna de ar abaixo do EC da altura de medição (*Sc*), ou seja:

$$NEE = F_{CO_2} (\mu mol m^{-2} s^{-1}) \quad (1)$$

O F<sub>CO<sub>2</sub></sub> foi calculado através da seguinte equação descrita no estudo de Mendes et al. (2020):

$$F_{CO_2} = \rho_{ar} \cdot \underline{w'c'} \rightarrow (\mu mol m^{-2} s^{-1}) \quad (2)$$

Onde  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar e *w'c'* é a covariância entre as flutuações na velocidade vertical do vento e densidade do CO<sub>2</sub>.

Os valores de F<sub>CO<sub>2</sub></sub> foram calculados usando o software LoggerNet (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para a conversão dos dados de alta frequência no formato binário (TOB1) com um intervalo de tempo de 30 minutos. Posteriormente, os dados foram processados usando o software EdiRe (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>). O algoritmo EdiRe transforma dados de alta frequência de meia em meia hora, incluindo também uma série de correções: detecção de picos, correção de atraso de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O em relação ao componente vertical do vento. A rotação de coordenadas (rotação 2D) utiliza o método de ajuste planar, correção de temperatura virtual sônica, correções para flutuação de densidade (correção WPL) e correção de resposta de frequência (Mendes et al., 2020).

### 4.2.4.2 Controle de qualidade e detecção de dados fora da curva

O pós-processamento dos dados foi realizado em duas etapas: (i) avaliação da qualidade dos dados, rejeitando dados de baixa qualidade, associados a mau funcionamento do sensor e visivelmente inconsistentes, e; (ii) os dados foram submetidos a um algoritmo robusto de detecção de discrepância; O limiar de *u\** foi determinado com base no Teste de Ponto Móvel (MPT) aplicado em dados noturnos (Papale et al., 2006; Mendes et al., 2020).

A fim de eliminar flutuações espúrias nos dados de CO<sub>2</sub>, utilizou-se um algoritmo baseado em medianas móveis para a identificação de picos. Este método consistiu em separar a série de dados em uma parte suave e uma parte residual, e, remover manualmente todos os dados espúrios. As lacunas de dados originadas pela remoção dos picos foram preenchidas usando um algoritmo de amostragem de distribuição marginal, que considera não apenas a covariância entre os fluxos e dados meteorológicos, mas também a autocorrelação temporal dos fluxos (Reichstein et al., 2005; Mendes et al., 2020).

Neste algoritmo, os dados de fluxo ausentes, mais os dados meteorológicos (Rg, Tair e VPD) disponíveis, preencheram a lacuna com o valor médio considerando condições ambientais semelhantes em uma janela de 7 dias (Oliveira et al., 2021). O método de preenchimento de lacunas foi realizado por meio de uma ferramenta online do Instituto Max Planck (Max Planck Institute for Biogeochemistry -<http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/>).

#### 4.2.4.3 Particionamento do Fluxo de CO<sub>2</sub>

Os fluxos de dióxido de carbono foram particionados para separar a Troca líquida do Ecossistema (NEE) em Produtividade Primária Bruta (GPP) e Respiração do Ecossistema (R<sub>eco</sub>). Utilizou-se um método de particionamento de fluxo conforme Mendes et al. (2020). Para os períodos noturnos, considerou-se o GPP igual a zero e, portanto, o NEE foi estimado da seguinte forma:

Para os períodos noturnos, foi considerado o GPP como zero e, portanto, NEE foi estimado da seguinte forma:

$$NEE = R_{eco}, \text{ para períodos noturnos} \quad (3)$$

Para os períodos diurnos, a Reco foi obtida como:

$$NEE = R_{eco} - GPP, \text{ para períodos diurnos} \quad (4)$$

Os fluxos noturnos foram ajustados em relação ao Tair através da equação (Lloyd, J.; Taylor, 1994; Mendes et al., 2020):

$$R_{eco} = R_{eco.ref} \cdot \exp\left(E_0 \cdot \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{ar} - T_0}\right)\right) \quad (5)$$

Onde  $R_{eco}$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) é a soma das taxas de respiração autotrófica e heterotrófica, e  $R_{eco.ref}$  é a taxa de respiração em uma temperatura de referência  $T_{ref}$  ( $15^\circ \text{C}$ ).  $E_0$  (K) é a energia de ativação ou o  $R_{eco}$  dependência da temperatura expressa como um valor de temperatura, e  $T_0$  é a temperatura da linha de base ajustada para  $42,02^\circ \text{C}$ . Este modelo relaciona  $R_{eco}$  e  $T_{air}$  para dados noturnos e a função obtida é então usada para extrapolar valores de  $R_{eco}$  para os períodos diurnos.

Ambos  $R_{eco}$  e GPP foram calculados usando a ferramenta online do Instituto Max Planck (Max Planck Institute for Biogeochemistry - <http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/>). Este procedimento não incorporou o particionamento de fluxo de  $\text{CO}_2$  para o método de detecção de qualquer inibição aparente na escala do ecossistema da respiração diurna, o que poderia superestimar o GPP, conforme sugerido em descobertas recentes (Keenan et al., 2019).

A resposta de NEE à luz foi avaliada pela a estimativa com base em dados diurnos de NEE sendo modelada usando a curva comum de resposta à luz hiperbólica retangular (Mendes et al., 2020):

$$NEE = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot R_g}{\alpha \cdot R_g + \beta} + \gamma \quad (6)$$

Onde  $\alpha$  ( $\text{mol CJ}^{-1}$ ) é a eficiência do uso da luz e representa a inclinação inicial da curva de resposta à luz,  $\beta$  ( $\mu\text{mol C m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) é o máximo da taxa de absorção de  $\text{CO}_2$  do dossel na saturação de luz.  $\gamma$  ( $\mu\text{mol C m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) é a respiração do ecossistema e  $R_g$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é a radiação global. O NEE (meio-dia) foi calculado entre 10:00 e 12:00 (hora local), enquanto a média de NEE (noite) foi calculada entre 20:00 e 22:00 (horário local).

#### 4.2.4.4 Evapotranspiração e Uso eficiente de água

A evapotranspiração (ET) da Caatinga foi estimada através do calor latente (LE) da seguinte forma (Costa et al., 2022):

$$ET = 86,400 \cdot \frac{LE}{L} \quad (7)$$

O Uso eficiente de água (WUE) foi calculado da seguinte forma (Costa et al., 2022):

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (8)$$

#### 4.2.5 Estado da vegetação

Para avaliar a sazonalidade da cobertura vegetal em resposta à variação sazonal da chuva, utilizou-se o índice de vegetação melhorado (EVI). É obtido através do produto MOD13Q1 do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo do satélite Terra (United State Geological Survey) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Os dados de EVI foram usados para avaliar os efeitos das condições da floresta em relação às trocas de CO<sub>2</sub> (Kim et al., 2018).

#### 4.2.6 Análises estatísticas

As médias diárias dos componentes do fluxo de CO<sub>2</sub> e das variáveis biofísicas foram inicializados em intervalos sazonais para a estimativa de variância aleatória ( $\pm$  95% do intervalo de confiança - IC) sobre a média de acordo com a metodologia apresentada na literatura (Mendes et al., 2020). Diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ) no valor médio sazonal para uma determinada variável biofísica ou para os componentes do fluxo de CO<sub>2</sub> foram determinados pelo grau de sobreposição no IC bootstrap de 95% (Ma et al. 2016; Mendes et al., 2020). Além disso, os coeficientes do modelo foram testados sob a hipótese nula em um nível de significância de 5%.

Também se utilizou a Modelagem de Equações Estruturais (SEM) que consiste em uma ferramenta estatística multivariada que permite testar relações causais ou correlativas entre diferentes variáveis. O modelo SEM em geral, considerou um conjunto completo de hipóteses baseadas na literatura e análises exploratórias precedentes (Rojas-Robles et al., 2020; Vargas-Terminel et al., 2022).

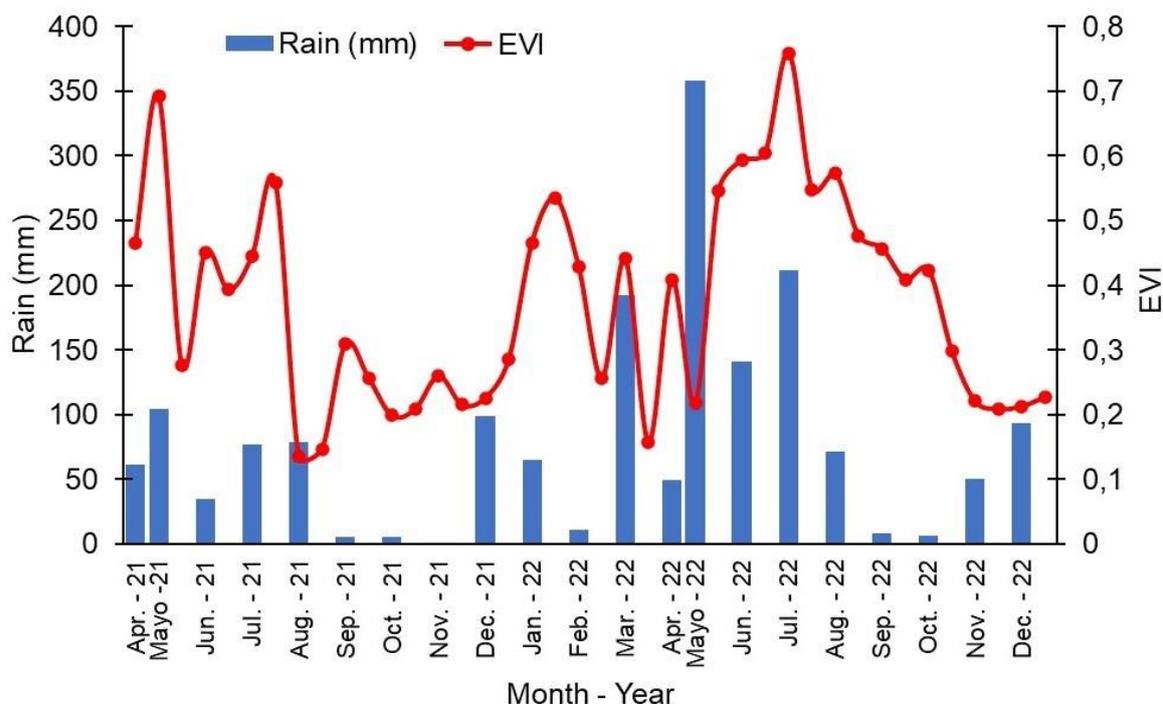
Resumidamente, hipotetizou-se que a radiação global (R<sub>g</sub>) controlaria o calor sensível (H) positivamente. O H não controlaria a evapotranspiração (ET) positivamente e temperatura do ar (T<sub>air</sub>) negativamente, e a T<sub>air</sub> controlaria a T<sub>soil</sub> positivamente. A Umidade Relativa (Rh) controlaria o VPD negativamente, a ET o Uso eficiente de água (WUE) negativamente, e o GPP positivamente. Por fim, o NEE seria controlado positivamente pelo GPP e negativamente pela R<sub>eco</sub>. O modelo geral foi aplicado e vários modelos foram executados e os mais bem ajustados foram selecionados de acordo com o ajuste de qualidade e significância (Curiel Yuste et al., 2019).

### 4.3 RESULTADOS

#### 4.3.1 Condições ambientais e EVI

Em relação ao somatório total de chuvas, durante todo o período desde abril de 2021 até dezembro de 2022, choveu 1726 mm, sendo que somente em 2022 foram 1258,2 mm. A estação chuvosa teve seu pico de precipitação no mês de julho de 2022 (Figura 7).

O valor sazonal do Índice de Vegetação Melhorado (EVI) apresentou o padrão da fenologia de superfície quanto à estrutura do dossel e ao desenvolvimento da área florestal. Pode ser observado na figura 7, que a sazonalidade da floresta está diretamente relacionada aos padrões locais de precipitação. O pico do valor de EVI ( $> 0,7$ ) foi após o pico da estação chuvosa de 2022 no mês de julho, propiciando maior atividade foliar e produtividade da floresta, e diminuindo posteriormente em magnitude com o estabelecimento da estação seca, ( $< 0,2$ ) indicando o período de senescência na floresta Caatinga.



**Figura 7.** Precipitação e Índice de Vegetação Melhorado (EVI) na Caatinga (RL-INSA) durante o período estudado.

Esses resultados mostram que a duração do período úmido e a precipitação total acumulada modularam o comportamento das taxas de fixação de carbono no bioma.

### 4.3.2 Variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub>

As médias sazonais e anual acumulada do particionamento do fluxo de CO<sub>2</sub> são apresentadas na Tabela 7. A média sazonal de GPP em 2022 variou de 6,59 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na estação seca a 7,14 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na estação chuvosa, tendo aumento de 8,3%. O R<sub>eco</sub> teve um aumento significativo da estação seca de 2,32 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para 4,53 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na estação chuvosa, aumentando 95% (Tabela 3). Conseqüentemente, o NEE teve uma redução de seus dados de -4,24 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na estação seca, para -2,59 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na estação chuvosa, representando uma diminuição de 64%.

**Tabela 7.** Médias ± Desvio Padrão sazonal e anual para Produtividade Primária Bruta, Respiração do Ecossistema e Troca Líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema para o ano de 2022.

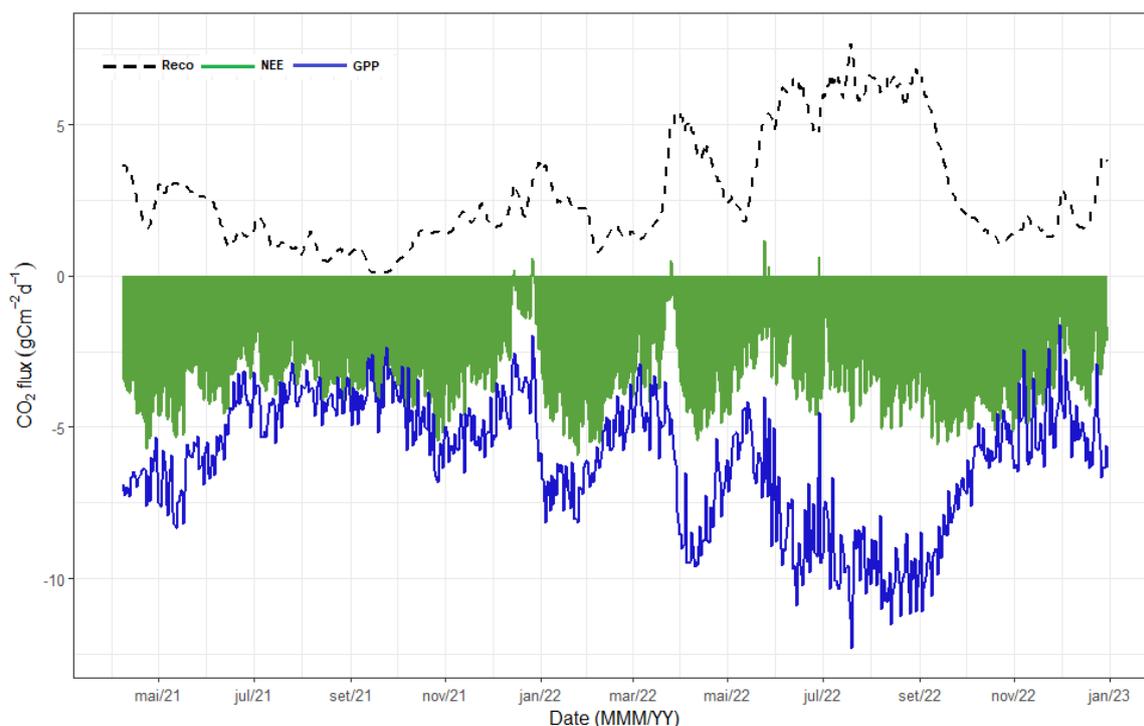
Variáveis	E. Seca	E. Chuvosa	Anual	Total
GPP (g C m <sup>-2</sup> )	6,59± 1,71	7,14 ± 2,24	6,95 ± 2,10	2,535
R <sub>eco</sub> (g C m <sup>-2</sup> )	2,32± 1,58	4,53 ± 1,52	3,52 ± 1,96	1,286
NEE (g C m <sup>-2</sup> )	-4,24 ± 0,75	-2,59 ± 1,18	-3,40 ± 1,23	-1,243

N=365.

Em relação aos fluxos de carbono (GPP, NEE e R<sub>eco</sub>) (Fig. 8) no geral, houve clara variabilidade temporal moduladas pelas condições de alta precipitação durante o período analisado. O GPP e R<sub>eco</sub> de maneira inversa na estação chuvosa aumentaram e atingiram seu pico no mês de julho e agosto de 2022. Os fluxos de carbono mais baixos ocorreram na estação seca entre setembro e outubro de 2022, principalmente para o R<sub>eco</sub>.

O padrão sazonal do NEE também foi influenciado pelas condições de precipitação local e a floresta Caatinga se comportou como sumidouro de carbono durante o período analisado (NEE < 0). Como esperado, o maior pico de NEE foi no início da estação chuvosa de 2022 nos meses de fevereiro e março. A maior absorção de carbono foi observada durante os meses mais úmidos. Ao final da estação

chuvosa, a absorção (GPP) diminuiu, mas no geral a Caatinga ainda se comportou como sumidouro de carbono até o fim do período analisado.



**Figura 8.** Troca líquida diária cumulativa de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), produtividade primária bruta (GPP) e respiração do ecossistema (Reco) durante todo o período de estudo na RL do INSA. A troca líquida de CO<sub>2</sub> foi denotada como negativa e a liberação de carbono foi denotada como positiva.

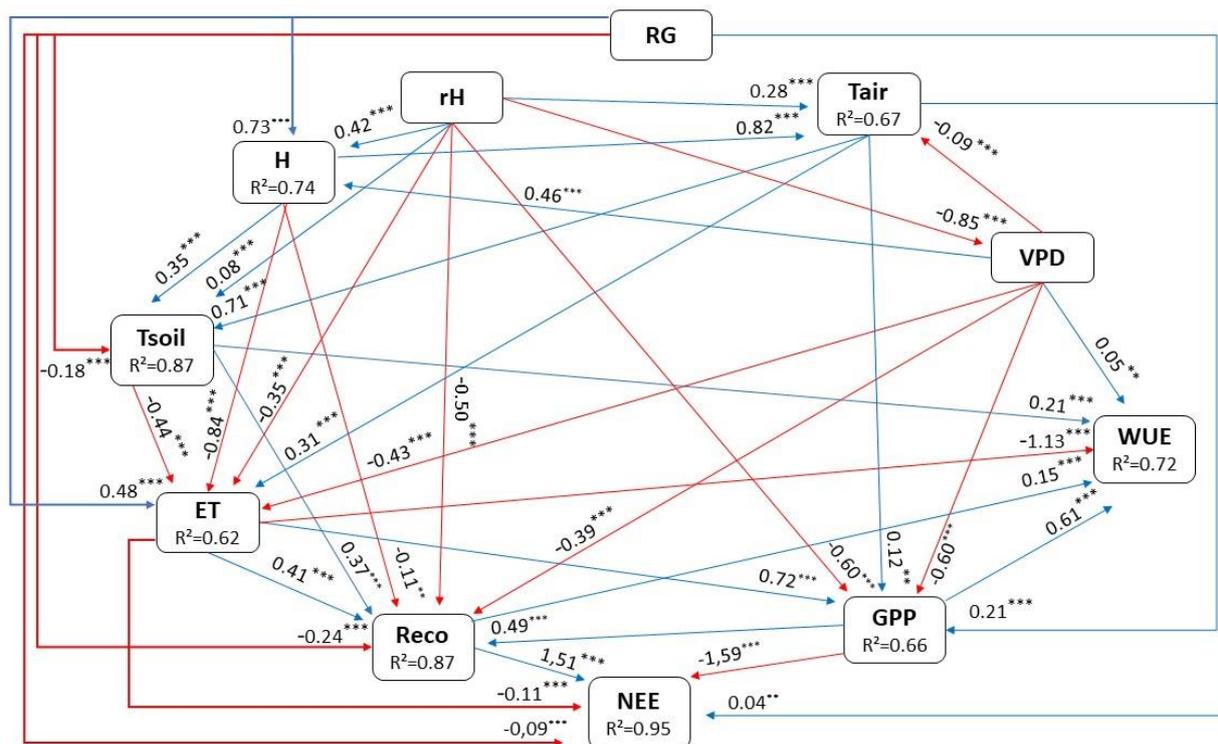
#### 4.3.3 Relação causal entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e variáveis biofísicas

Os modelos de equações estruturais apresentaram interações significativas e complexas de causa e efeito entre as variáveis biofísicas e o fluxo de CO<sub>2</sub> (Figura 9). As explicações individuais dos modelos sobre as variáveis foram para NEE ( $R^2=0,95$ ), Reco e Tsoil ( $R^2=0,87$ ) ambas, H ( $R^2=0,74$ ), WUE ( $R^2=0,72$ ), Tair ( $R^2=0,67$ ), GPP ( $R^2=0,66$ ) e ET ( $R^2=0,62$ ).

As variáveis preditoras que mais causaram efeito foram a RH, Rg, VPD, Tair e H e, as variáveis respostas mais afetadas quantitativamente foram Reco, ET, NEE, GPP e WUE, respectivamente (Figura 9). As variáveis Rg e ET afetaram de maneira simultânea o fluxo de CO<sub>2</sub> (GPP, Reco e NEE).

Entre as variáveis, o NEE obteve maior interação negativa com GPP (-1,59) e positiva com Reco (1,51). Em seguida, a ET obteve efeito negativo com WUE (-1,13), e de forma positiva com H (0,84) e GPP (0,72). O RH obteve efeito negativo com o

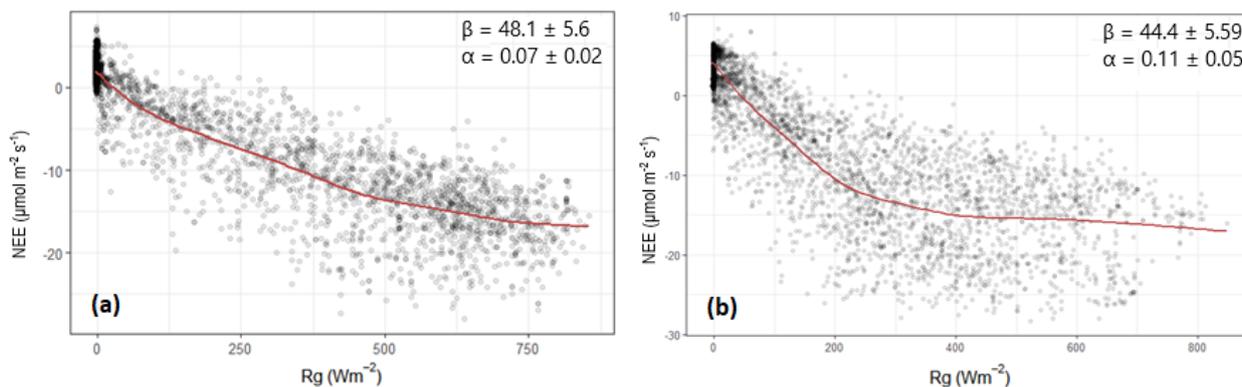
VPD (-0,85). O H e Rg se relacionaram positivamente (0,73). O maior efeito de Tair foi positivo com Tsoil (0,71). Abaixo na figura 9, pode ser observado o diagrama de caminho representando o modelo investigado.



**Figura 9.** Modelo de equações estruturais da RL do INSA para o ano de 2022. As setas representam relações unidirecionais entre as variáveis de Radiação Global (Rg), Calor sensível (H), Umidade Relativa (rH), Déficit de Pressão de Vapor (VPD), Temperatura do ar (Tair), Evapotranspiração (ET), Temperatura do solo (Tsoil), Uso eficiente de água (WUE), Produtividade Primária Bruta (GPP), Respiração do ecossistema (Reco) e Troca Líquida de CO<sub>2</sub> do Ecossistema (NEE).

#### 4.3.4 Relação entre troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema e radiação global

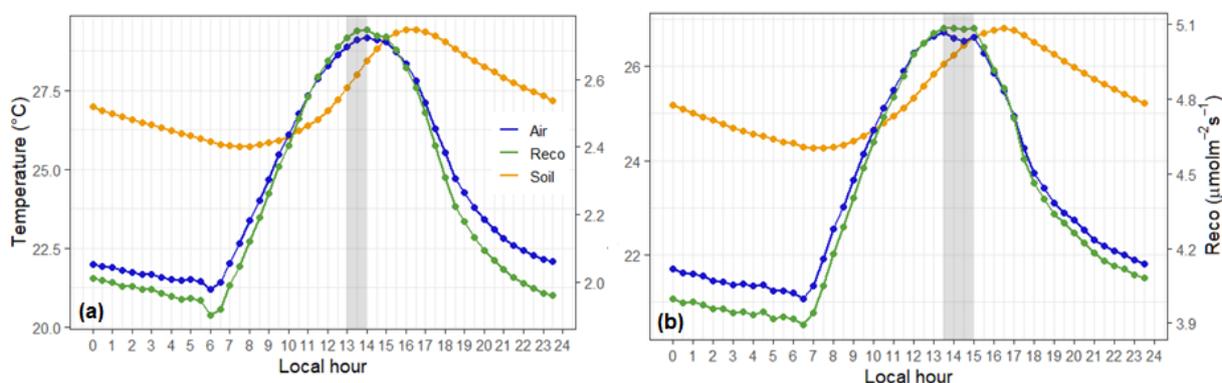
A relação entre a troca líquida de CO<sub>2</sub> e a radiação global ocorreu na medida que a radiação aumentou sua intensidade ao longo do período diurno, provocando maior a troca líquida de CO<sub>2</sub>. As curvas relacionadas à troca líquida de CO<sub>2</sub> e radiação solar apresentaram diferentes respostas, sendo o  $\alpha$  maior na estação chuvosa e o  $\beta$  na estação seca, o que pode ser observado pela diferença na inclinação da curva no eixo y do NEE (Fig. 10 (b)).



**Figura 10.** Relação Hiperbólica entre a Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) e Radiação Global (Rg) para as estações seca (a) e chuvosa (b) na RL do INSA para o ano de 2022.

#### 4.3.5 Variações diurnas de R<sub>eco</sub> e NEE com temperatura do solo e do ar

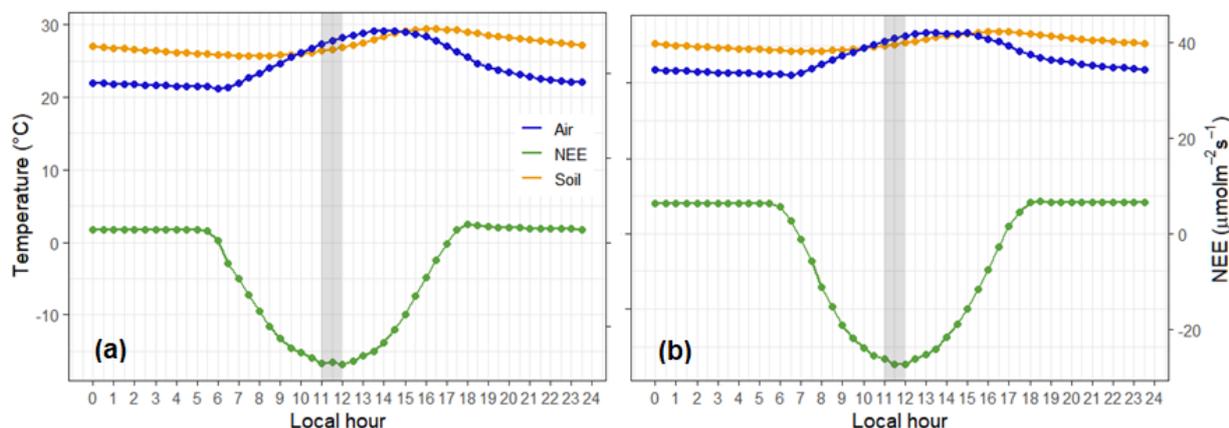
As respostas dos ciclos diurnos de R<sub>eco</sub> e NEE em relação à temperatura do ar e do solo são apresentadas nas figuras 11 e 12, as mesmas para ambas as estações não tiveram diferenças significativas. Foram elaboradas curvas para identificar a existência dessa variação na escala diária, tanto da temperatura do ar quanto da temperatura do solo. Os maiores valores de R<sub>eco</sub> foram observados entre 13:00 e 14:00 h, na estação seca, e 14:00 e 15:00 h, coincidindo com o pico máximo de temperatura do ar e do solo 27 à 29 °C.



**Figura 11.** Variações diurnas da Respiração do ecossistema (R<sub>eco</sub>), temperatura do ar (Air) e temperatura do solo (Soil) para as estações seca (a) e chuvosa (b) na RL do INSA. A caixa cinza representa o horário do dia em que R<sub>eco</sub> apresentou seu pico para o ano de 2022.

Os picos diurnos de Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema na estação seca e chuvosa ocorreram entre as temperaturas de 28 e 30 °C, e na estação seca entre 30

e 33 °C (Fig. 12), diminuindo gradualmente com o aumento de  $T_{air}$  e  $T_{soil}$  após o meio-dia.



**Figura 12.** Variações diurnas da Troca líquida de  $\text{CO}_2$  do ecossistema (NEE), temperatura do ar (Air) e temperatura do solo (Soil) para as estações seca (a) e chuvosa (b) na RL do INSA. A caixa cinza representa o horário do dia em que NEE apresentou seu pico para o ano de 2022.

## 4.4 DISCUSSÃO

### 4.4.1 Condições ambientais e EVI

Durante o período de realização desta pesquisa, ocorreu uma transição de um ciclo de anos consecutivos de chuvas abaixo da média para chuvas acima da média na região semiárida no estado da Paraíba, Brasil. Em geral, os resultados apresentaram o papel relevante das chuvas na definição da sazonalidade nas regiões semiáridas, sobretudo na RL do INSA. Nesses ecossistemas, a disponibilidade de recursos naturais como água e biomassa vegetal é modulada principalmente pela ocorrência de chuvas (Silva et al., 2017). Durante a estação chuvosa, por conta da umidade, houve mais nutrientes disponíveis no solo, resultando em uma absorção mais rápida e eficiente pelas plantas, aumentando o desenvolvimento foliar e a produtividade do ecossistema (Oliveira et al., 2021).

Nos períodos de escassez de chuvas, houve reduções nos valores do índice de vegetação aprimorada (EVI) (figura 7) na área estudada, refletindo a redução da área foliar devido ao abortamento das árvores e arbustos da floresta durante a estação seca. Desse modo, as folhas sofrem senescência e a absorção de  $\text{CO}_2$  reduz ao mínimo (Oliveira et al., 2021). Durante a estação seca, as árvores sofrem gradualmente com o declínio do teor de água do solo, o que leva ao fechamento

estomático e da transpiração das folhas (Silva et al., 2017). Processo bem semelhante ao resultado descrito neste estudo (Figura 7), ocorreu nos trabalhos de Mendes et al. (2020) e Costa et al. (2022) em uma floresta tropical sazonalmente seca tipo Caatinga no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.

#### **4.4.2 Variabilidade dos fluxos de CO<sub>2</sub>**

Foi observado que GPP, R<sub>eco</sub> e NEE apresentaram variação sazonal marcada em sincronia com a precipitação (Figura 8). O GPP se manteve com fluxo com valores expressivos em ambas as estações. O Reco aumentou no início da estação chuvosa, aumentando a disponibilidade hídrica do solo suprimindo os processos fisiológicos das plantas. Entre a transição da estação seca para a chuvosa, o R<sub>eco</sub> teve um aumento de 95%, o GPP de 8% logo, a produtividade primária bruta superou os valores da respiração do ecossistema e a Caatinga atuou como sumidouro de carbono. O NEE apresentou sazonalidade semelhante ao GPP e R<sub>eco</sub>, seguindo o padrão das chuvas, contudo houve uma diminuição de 39% na estação seca para a chuvosa, por conta do aumento do R<sub>eco</sub> na estação chuvosa. Em seu estudo, Mekonnen et al. (2016) relata que à alta atividade microbiana está associada a maior disponibilidade de água no solo, contribuindo para o aumento da respiração autotrófica e, conseqüentemente, da respiração do ecossistema.

#### **4.4.3 Relação causal entre o fluxo de CO<sub>2</sub> e variáveis biofísicas**

Sobre às relações entre os modelos de equação estruturais de causa e efeito, a maior relação ocorreu negativamente entre GPP e NEE, implicando que à medida que a produtividade aumentou, a troca líquida de CO<sub>2</sub> no ecossistema diminuiu (Figura 9). Este resultado indica que as condições biofísicas na floresta foram propícias, apontando que a Caatinga na área estudada e durante o estudo absorveu mais carbono que o emitiu (Rojas-Robles et al., 2020).

Outra forte relação ocorrida foi entre R<sub>eco</sub> e NEE positivamente, no qual quando a taxa de respiração do ecossistema aumentou provocou um equilíbrio na troca líquida de CO<sub>2</sub>. Este processo ocorreu por conta de a respiração ser um processo relacionado aos organismos vivos, que libera dióxido de carbono na atmosfera como produto residual do metabolismo contribuindo com a troca líquida de CO<sub>2</sub> (Oliveira et al., 2021).

Entre as variáveis biofísicas a maior relação foi entre ET e WUE, por essa eficiência do uso de água ser uma medida da quantidade de carbono fixado pela a floresta em relação à quantidade de água perdida por evapotranspiração (Marques et al., 2020). No trabalho de Costa et al. (2022) a ET e WUE também tiveram forte correlação negativa entre as duas variáveis na floresta em domínio de Caatinga. A média anual de WUE ( $\text{g C kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) para este estudo foi de 5,34 para o ano de 2022, sendo maior que em anos anteriores, avaliado na mesma área, segundo estudos de Oliveira et al. (2021), 2,40, 2,96 e 3,32 para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente. O Uso eficiente de água (WUE), é a taxa de absorção de carbono por unidade de água perdida, sendo um parâmetro importante para a compreensão do metabolismo dos ecossistemas terrestres, sobretudo semiáridos (Tang et al., 2014; Silva et al., 2017).

Houve forte relação negativa entre RH e VPD por conta de as temperaturas mais quentes afetarem a umidade relativa, consequentemente aumentar a VPD e vice-versa. Outra forte relação negativa foi entre H e ET, neste contexto, ocorreu por conta de as chuvas acima da média terem maior disponibilidade de água no solo e, na vegetação permitiu maior ET por causa da incidência de elevada radiação (Figura 9).

Ocorreu relação positiva entre RG e H em virtude de a radiação ser a principal fonte de energia na superfície terrestre, sendo parte refletida enquanto outra parte é absorvida pelo solo e a floresta sendo convertida em calor (Campos et al., 2019). Houve também correlação positiva entre  $T_{\text{air}}$  e  $T_{\text{soil}}$ , em razão do sensor localizar-se na camada superficial do solo (0-5 cm), sendo afetada à medida que a  $T_{\text{air}}$  aumenta a  $T_{\text{soil}}$  aumenta também, uma vez que estar mais exposta a radiação solar e aos efeitos do vento. Ocorreu relação positiva também entre ET e GPP, logo, por haver mais água disponível no sistema, os estômatos se mantêm abertos para assegurar a transpiração das espécies e absorver dióxido de carbono para a fotossíntese (Costa et al., 2022) (Figura 9).

#### **4.4.4 Relação entre Troca Líquida de $\text{CO}_2$ do Ecossistema e Radiação global**

O controle dos componentes da radiação global e em NEE (Figura 10), já era esperado devido a variável NEE ser dependente da variável  $R_g$  que é a preditora. O NEE apresentou relação hiperbólica com  $R_g$  na estação chuvosa, enquanto na

estação seca a relação foi mais linear, saturando em cerca de  $750 \text{ Wm}^{-2}$ . O  $\alpha$  que representa a eficiência no uso de luz à inclinação inicial da curva em resposta à radiação, apontou que o NEE na estação chuvosa teve condições mais favoráveis de realizar a troca de  $\text{CO}_2$ . Em processo oposto, o  $\beta$  que é o máximo de absorção de  $\text{CO}_2$  no estrato florestal sob saturação pela luz, houve maior taxa de absorção de carbono na estação seca, possivelmente por haver mais radiação incidente induzindo e vegetação nativa já possuir estratégias para realização de seus processos fotossintéticos (Figura 10). Esse resultado é semelhante com o estudo de Mendes et al. (2020) que identificou que o  $R_g$  também controlou a variabilidade sazonal e interanual de GPP e NEE em outro fragmento florestal de reserva legal de Caatinga no sertão do Rio Grande do Norte.

#### **4.4.5 Variações diurnas de $R_{\text{eco}}$ e NEE com temperatura do solo e do ar**

Sobre as variáveis NEE e  $R_{\text{eco}}$  em respostas às variações diurnas em função da temperatura do ar e do solo (Figuras 10 e 11), durante as estações chuvosa e seca no período estudado na Caatinga, não houve significativa alteração. Este resultado apresenta praticamente a mesma resposta de horário da troca líquida durante a estação chuvosa em comparação às taxas de respiração na estação seca. Diferentemente deste resultado, Silva et al. (2017) em área de Caatinga em Pernambuco e Mendes et al. (2020) no Rio Grande do Norte, Brasil obtiveram mudanças de NEE entre as estações seca e chuvosa. O  $R_{\text{eco}}$  foi mais sensível à temperatura do ar durante a estação seca com maiores perdas de carbono entre 28 e 29 °C. No entanto, não há aumento notável para o  $R_{\text{eco}}$  com o aumento das temperaturas máximas do ar em condições de déficit hídrico (Fig. 12). Possivelmente não houve diferenças significativas entre as estações seca e chuvosa devido que no local do período estudado houve chuvas acima das médias por um intervalo mais prolongado que o normal. Para muitos biomas, tem sido demonstrado que a temperatura tem uma forte influência no  $R_{\text{eco}}$  e é um fator relevante no controle do metabolismo de plantas e decompositores (Lasslop et al., 2010; Zanella et al., 2016; Mendes et al., 2020). Os dados do presente estudo apontam a relação diária entre a temperatura do ar e do solo e a sazonalidade de NEE e  $R_{\text{eco}}$  na Caatinga (Figuras 11 e 12). Durante o período de estudo, a

ocorrência de valores mais baixos de Tair pode ser atribuída à ocorrência de um evento La Niña.

#### 4.4.6 Troca líquida de CO<sub>2</sub> no ecossistema

Os resultados dos valores líquidos de CO<sub>2</sub> (NEE) descrito neste trabalho, servem como base de comparação com outras avaliações realizadas na floresta de Caatinga bem como em outras florestas tropicais sazonalmente secas (Tabela 8). Os maiores valores de NEE foram desta pesquisa, exceto para Oliveira et al. (2021) que obteve no ano 2016 o valor de NEE um pouco maior, entretanto na mesma área em que foi realizado este trabalho.

**Tabela 8.** Visão geral dos valores anuais da troca líquida de ecossistemas (NEE) para vários ecossistemas de floresta tropical sazonalmente seca.

<b>Ecossistema</b>	<b>NEE</b> (g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup> )	<b>Precipitação</b> (mm)	<b>Período</b>	<b>Local</b>	<b>Referência</b>
Caatinga	-874 -1.243	570 1258	2021 2022	Brasil-PB	Esta pesquisa
Caatinga	-393 -1.008 -777 -1.294	754 713 558 440	2013 2014 2015 2016	Brasil-PB	Oliveira et al. (2021)
Caatinga	-212	430	2014/2015	Brasil-PE	Silva et al. (2017)
Caatinga	-169 -145	513 466	2014 2015	Brasil-RN	Mendes et al. (2020)
Caatinga	-444	907	2014	Brasil-PE	(Oliveira et al. 2023)
Cerrado	-242 -357	570 676	2012 2013	Brasil-MT	Zanella de Arruda et al. (2016)
Floresta Tropical Seca	-180,9 -294,5 -207,9	733 579 856	2016 2017 2018	Sonora, México	Rojas-Robles et al. (2020)
Savanna	-271	553	2012	Senegal	Tagesson et al. (2015)
Savanna	-258	565	2018	Muga,	Eamus et al.

Em comparação com outros tipos de florestas secas, a Caatinga pode ser considerada um grande sumidouro de carbono com uma assimilação média de  $-12,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no período de estudo. Comparada a outros ambientes de clima semiárido, a floresta Caatinga demonstra ter função fundamental em contribuir para mitigação das emissões antropogênicas de  $\text{CO}_2$ , um dos principais gases do aquecimento global.

#### 4.5 CONCLUSÕES

As maiores explicações para as variáveis de acordo com o modelo de equações estruturais foram para as trocas líquidas de  $\text{CO}_2$  do ecossistema, respiração do ecossistema, temperatura do solo, calor sensível e uso eficiente da água.

Igualmente na estação seca a produtividade primária bruta se manteve com valores moderados e obteve seu pico na estação chuvosa. A respiração do ecossistema foi máxima nos meses chuvosos e mínima durante os meses secos devido à baixa umidade no solo. Mesmo durante a estação seca, o NEE esteve em equilíbrio e a Caatinga funcionou como um sumidouro atmosférico de  $\text{CO}_2$  durante o período de estudo.

Os valores de EVI acompanharam as ocorrências de chuva, tendo seu valor máximo na estação chuvosa. Para ambas as estações, durante o período analisado não houve diferença significativa em função do horário para a respiração do ecossistema nem para a troca líquida de  $\text{CO}_2$ .

#### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa avaliou a variabilidade temporal do fluxo de  $\text{CO}_2$  e os efeitos das variáveis biofísicas afetam o fluxo de  $\text{CO}_2$  no sistema solo-planta-atmosfera em uma floresta tropical sazonal seca no Semiárido paraibano. O fluxo de carbono na floresta Caatinga está relacionado à sazonalidade das chuvas.

A respiração do solo foi afetada pela sazonalidade pluviométrica tendo seu pico de emissão de fluxo de CO<sub>2</sub> atingido durante a estação chuvosa. Em comparação com outras florestas secas, a Caatinga obteve os maiores valores de Troca Líquida do Ecossistema. Este estudo contribui para diminuir as incertezas sobre qual é o real papel da floresta Caatinga em relação ao equilíbrio positivo do fluxo de carbono regional e globalmente.

## REFERÊNCIAS

- Araújo, A. C., Dolman, A. J., Waterloo, M. J., Gash, J. H. C., Kruijt, B., Zanchi, F. . B., Lange, J. M. E., Stoevelaar, R., Manzi, A. O., Nobre, A. D., Looftens, R. N., Backer, J. 2010. The spatial variability of CO<sub>2</sub> storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.005>
- Borges, C.K., Santos, C.A.C., Carneiro, R.G., Silva, L.L., de Oliveira, G., Mariano, D., Silva, M.T., da Silva, B.B., Bezerra, B.G., Perez-Marin, A.M., Medeiros, S.S. 2020. Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. *Environ. Monit. Assess.* 192, 524. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- Campos, S., Mendes, K.R., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Medeiros, S.S., Amorim, L.B., dos Santos, C.A.C., Perez-Marin, A.M., Ramos, T.M., Marques, T.V., Lucio, P.S., Costa, G.B., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., 2019. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agric. For. Meteorol.* 271, 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>
- Costa, G.B., Mendes, K.R., Viana, L.B., Almeida, G.V., Mutti, P.R., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., Marques, T.V., Ferreira, R.R., Oliveira, C.P., et al. 2022. Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 14, 3955. <https://doi.org/10.3390/rs14163955>
- Curiel-Yuste, J., Flores-Rentería, D., García-Angulo, D., Heres, A.M., Braga, C., Petritan, A.M., Petritan, I.C. 2019. Cascading Effects Associated with Climate Change Induced Conifer Mortality in Mountain Temperate Forests Result in Hot-Spots of Soil CO<sub>2</sub> Emissions. *Soil Biol. Biochem.* 133, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.02.017>
- Eamus, D., Cleverly, J.R., Boulain, N., Grant, M.N. 2013. Carbon and water fluxes in an arid-zone Acacia savanna woodland: an analysis of seasonal patterns and responses to rainfall events. *Agric. For. Meteorol.* 182-183, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.020>
- Jia, X., Zha, T., Gong, J., Zhang, Y., Wu, B., Qin, S., Peltola, H. 2018. Multi-scale dynamics and environmental controls on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over a temperate semiarid shrubland. *Agric. For. Meteorol.* 259, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.009>
- Keenan, T.F., Migliavacca, M., Papale, D., Baldocchi, D. 2019. Widespread inhibition of daytime ecosystem respiration. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 407–415. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0809-2>
- Kim, J., Hwang, T., Schaaf, C.L., Kljun, N., Munger, J.W. 2018. Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO<sub>2</sub> measurements in a mixed hardwood-conifer forest. *Agric. For. Meteorol.* 253–254, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.004>

Koch, R., Almeida-Cortez, J.S., Kleinschmit, B. 2016. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: combination of modelled plant diversity hotspots and threat patterns. *J. Nat. Conserv.*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.11.004>

Lasslop, G., Reichstein, M., Papale, D., Richardson, A.D. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Glob. Chang. Biol.* 16, 187–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>

Lloyd, J., Taylor, J. A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.* 8, 315–323. <https://doi.org/10.2307/2389824>

Liu, Z., Zhang, Y., Fa, K., Qin, S., She, W. 2017. Rainfall pulses modify soil carbon emission in a semiarid desert. *Catena.* 155, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.011>

Ma, X., Huede, A., Cleverly, J.R., Eamus, D. 2016. Drought rapidly diminishes the large net CO<sub>2</sub> uptake in 2011 over semi-arid Australia. *Sci. Rep.* 6, 37747. <https://doi.org/10.1038/sreo37747>

Marques, T.V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A.M., Campos, S., Lúcio, P.S., Lima, K., dos Reis, J., Ramos, T.M., da Silva, D.F., Oliveira, C.P., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., e Silva, C.M.S., Bezerra, B. 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agric. For. Meteorol.*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>

Mekonnen, Z.A.; Grant, R.; Schwalm, C. 2016. Contrasting changes in gross primary productivity of different regions of North America as affected by warming in recent decades. *Agric. For. Meteorol.* 218, 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.016>

Mendes, K.R., Campos, S., da Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Perez- Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., Vieira, M.M.L., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Bezerra, B.G., Silva, C.M.S. 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Sci. Rep.* 10, 9454. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>

Mendes, K.R., Campos, S., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Ramos, T.M., Marques, T.V., Reis, J.S., Lima Vieira, M.M., Silva, A.C.N., Marques, A.M.S. 2021. Assessment of SITE for CO<sub>2</sub> and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). *Forests.* 12, 86. <https://doi.org/10.3390/f12010086>

Oliveira, M.L., Santos, C.A.C., Oliveira, G., Perez-Marin, A.M., Santos, C.A.G. 2021. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of the Total Environment.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>

Oliveira, C.L., Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Antonino, A.C.D., Alves, M.F.A.T., Silva, V.P., Lopes, M.H.L., Souza, E.S., Ferreira, R.C. 2023. A Caatinga emite ou sequestra carbono?. *Revista Brasileira de Geografia Física.* v.16, n.02, 791-804.

Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora E. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosci.* 3, 571–583. <https://doi.org/10.5194/bg-3-571-2006>

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: <<https://www.R-project.org>> (Accessed on June 10, 2021).

Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Glob. Change Biol.* 11, 1424–1439. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>

Rojas-Robles, N.E., Garatuza-Payán, J., Álvarez-Yépez, J.C., Sánchez-Mejía, Z.M., Vargas, R., Yépez, E.A. 2020. Environmental Controls on Carbon and Water Fluxes in an Old-Growth Tropical Dry Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125, e2020JG005666. <https://doi.org/10.1029/2020JG005666>

Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Alves, E.M. 2017. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *J. Arid Environ.* 147, 71–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>

Silva, A.C., Mendes, K.R., Silva, C.M.S., Rodrigues, D.T., Costa, G.B., da Silva, D.T.C., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Bezerra, B.G. 2021. Energy Balance, CO<sub>2</sub> Balance, and Meteorological Aspects of Desertification Hotspots in Northeast Brazil. *Water*, 13, 2962. <https://doi.org/10.3390/w13212962>

Souza, L. S. B. de, Moura, M. S. B. de, Sedyama, G. C., Silva, T. G. F. 2017. Carbon exchange in a caatinga area during an unusually drought year. *Agrometeoros*, 25(1), 37–45. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26265>

Tang, X., Li, H., Desai, A.R., Nagy, Z., Luo, J., Kolb, T.E., Olioso, A., Xu, X., Yao, L., Kutsch, W., Pilegaard, K., Barbara Kostner, B., Ammann, C. 2014. How is water use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Sci.Rep.* 4, 7483. <http://dx.doi.org/10.1038/srep07483>

Tagesson, T., Fensholt, R., Cropley, F., Guiro, I., Horion, S., Ehammer, A., Ardö, J. 2015. Dynamics in carbon exchange fluxes for a grazed semi-arid savanna ecosystem in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.017>

Vargas-Terminel, M.L., Flores-Rentería, D., Sánchez-Mejía, Z.M., Rojas-Robles, N.E. Sandoval-Aguilar, M., Chávez-Vergara, B. Robles-Morua, A., Garatuza-Payan, J., Yépez, E.A. 2022. Soil Respiration Is Influenced by Seasonality, Forest Succession and Contrasting Biophysical Controls in a Tropical Dry Forest in Northwestern Mexico. *Soil Syst.* 6, 75. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040075>

Yao, J., Liu, H., Huang, J., Gao, Z., Wang, G., Li, D., Yu, H., Chen, X. 2020. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production. *Nat. Commun.* 11, 1665. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15515-2>

Zanella de Arruda, P. H., Vourlitis, G.L., Santanna, F.B., Pinto Jr, O.B., Lobo, F.A., Nogueira, J.S. 2016. Large net CO<sub>2</sub> loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121, 2110–2124 .  
<https://doi.org/10.1002/2016JG003404>

Zha, T., Li, C., Kellomäki, S., Peltola, H., Wang, K.Y., Zhang, Y. 2013. Controls of evapotranspiration and CO<sub>2</sub> fluxes from scots pine by surface conductance and abiotic factors. *Plos One*, 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069027>