

Estimativas do sequestro de carbono em espécies predominantes na vegetação de caatinga: compreendendo a dinâmica do carbono em um bioma semiárido

Joélia Natália Bezerra da Silva¹, Jéssica Laís Bezerra da Silva², Maria Leidiane Ferreira³,
Josiclêda Domiciano Galvêncio⁴

¹ Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal de Pernambuco

² Bacharela em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF)

³ Graduação em andamento em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco

⁴ Docente Titular no Departamento de Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco.

Histórico do Artigo: Submetido em: 15/04/2025 – Revisado em: 14/06/2025 – Aceito em: 18/07/2025

RESUMO

As mudanças climáticas, gases de efeito estufa, o aquecimento global e seus possíveis efeitos vêm mostrando em inúmeros debates e estudos que as atividades humanas são apontadas com uma das maiores causas das alterações climáticas. No Brasil, a região Semiárida poderá ser uma das mais impactadas pelas mudanças no clima, e a vegetação predominante nessa região, a Caatinga, é bastante modificada ao longo do ano devido à grande variabilidade climática. Diante desse contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a estimativa da Produtividade Primária Bruta - GPP e Produtividade Primária Líquida - NEE em quatro espécies predominantes do bioma Caatinga. Foram coletados dados observados em campo com espectrorradiômetro, em dossel de uma área de Caatinga, em Petrolina, PE e aplicado o modelo da Produtividade Primária Bruta e da Produtividade Primária Líquida. Os resultados apontaram que em média, o dossel da caatinga realiza GPP e NEE menores do que as espécies dominantes, respectivamente $1,79 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $1,72 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. As espécies que obtiveram maiores estimativas do GPP e NEE foram a *Samanea tubulosa* e *Sapium argutum* com GPP $3,54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $3,47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e NEE $2,64 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $2,84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A utilização de espectrorradiômetros permitiu observar respostas específicas de fluxo de carbono, permitindo verificar como a absorção de Produtividade Primária Bruta e a Produtividade Primária Líquida varia entre as diferentes espécies.

Palavras-Chaves: FieldSpec, Ecossistema, Mudanças Climáticas.

Estimates of carbon sequestration in predominant species in caatinga vegetation: understanding carbon dynamics in a semi-arid biome

ABSTRACT

Climate change, greenhouse gases, global warming, and their potential effects have shown in numerous debates and studies that human activities are identified as one of the major causes of climate change. In Brazil, the Semi-arid region could be one of the most impacted by climate changes, and the predominant vegetation in this region, the Caatinga, is significantly modified throughout the year due to high climate variability. In this context, the aim of this research is to evaluate the estimates of Gross Primary Productivity (GPP) and Net Primary Productivity (NEE) in four predominant species of the Caatinga biome. Observational data were collected in the field with a spectroradiometer from the canopy of a Caatinga area in Petrolina, PE, and the models for Gross Primary Productivity and Net Primary Productivity were applied. The results indicated that, on average, the Caatinga canopy shows lower GPP and NEE compared to the dominant species, with values of $1.79 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $1.72 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively. The species with the highest estimates for GPP and NEE were *Samanea tubulosa* and *Sapium argutum*, with GPP values of $3.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $3.47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, and NEE values of $2.64 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and $2.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. The use of spectroradiometers allowed for the observation of specific carbon flux responses, enabling the assessment of how Gross Primary Productivity and Net Primary Productivity vary among different species.

Keywords: FieldSpec, Ecosystem, Climate Change.

Silva, J. N. B., Silva, J. L. B., Ferreira, M. L., Galvêncio, J.D (2025). Estimativas do Sequestro de Carbono em Espécies Predominantes na Vegetação de Caatinga: Compreendendo a Dinâmica do Carbono em um Bioma Semiárido. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.13, n.2, p.92-106.



Estimaciones del Secuestro de Carbono en Especies Predominantes de la Vegetación de Caatinga: Comprendiendo la Dinámica del Carbono en un Bioma Semiárido

RESUMEN

Los cambios climáticos, los gases de efecto invernadero, el calentamiento global y sus posibles efectos han demostrado en numerosos debates y estudios que las actividades humanas son señaladas como una de las principales causas de las alteraciones climáticas. En Brasil, la región Semiárida podría ser una de las más afectadas por los cambios en el clima, y la vegetación predominante en esta región, la Caatinga, experimenta modificaciones considerables a lo largo del año debido a la gran variabilidad climática. En este contexto, el objetivo de esta investigación es evaluar las estimaciones de la Productividad Primaria Bruta (GPP) y la Productividad Primaria Neta (NEE) en cuatro especies predominantes del bioma Caatinga. Se recolectaron datos observacionales en campo con un espectrorradiómetro en el dosel de un área de Caatinga en Petrolina, PE, y se aplicaron los modelos de Productividad Primaria Bruta y de Productividad Primaria Neta. Los resultados indicaron que, en promedio, el dosel de la caatinga presenta GPP y NEE menores en comparación con las especies dominantes, siendo respectivamente $1,79 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $1,72 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Las especies que mostraron mayores estimaciones de GPP y NEE fueron *Samanea tubulosa* y *Sapium argutum*, con GPP de $3,54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $3,47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, y NEE de $2,64 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $2,84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El uso de espectrorradiómetros permitió observar respuestas específicas del flujo de carbono, permitiendo verificar cómo varía la absorción de la Productividad Primaria Bruta y la Productividad Primaria Neta entre las diferentes especies.

Palabras clave: FieldSpec, Ecosistema, Cambios Climáticos

1. Introdução

As mudanças climáticas referem-se às alterações de longo prazo nos padrões climáticos médios ou extremos de uma região. Essas mudanças podem resultar de processos naturais e influenciadas por atividades humanas, como a expansão significativa das áreas propensas à desertificação (Silva et al., 2017), o acentuado aumento dos níveis dos oceanos (Embrapa, 2018), as transformações substanciais no funcionamento dos biomas (Miranda et al., 2020) e a notável redução da disponibilidade hídrica (Jesus et al., 2023), além da queda na produção de alimentos em diversas regiões do globo terrestre (Jiang et al., 2013).

Na última década, notáveis avanços foram alcançados na medição e compreensão dos padrões espaço-temporais dos fluxos de carbono, as observações atmosféricas, terrestres e espaciais têm exercido um papel essencial para os ecossistemas, essas melhorias têm contribuído significativamente para aprimorar a compreensão da dinâmica dos fluxos de carbono em escala global (Liu et al., 2014; Ma et al., 2016).

A Produtividade Primária Bruta (GPP, em inglês) e A Produtividade Primária Líquida (NEE, em inglês) são um dos alicerces fundamentais do ciclo do carbono, desempenhando um papel essencial na interação complexa entre as plantas e os demais componentes do ecossistema (Silva et al., 2024), além de ser importante para a produção de biomassa vegetal (Gomes et al., 2016), a GPP é uma etapa vital na remoção do carbono da atmosfera, exercendo impactos significativos no balanço global de carbono (Galvêncio et al., 2013; Silva et al., 2024), este processo não apenas influencia a regulação do clima global, mas também exerce um papel fundamental na preservação do equilíbrio ambiental (Costa et al., 2023), através da captura de dióxido de carbono atmosférico durante a fotossíntese, a GPP influencia diretamente a dinâmica dos biomas e contribui para a melhoria da qualidade do ar que respiramos, ao promover a redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (Silva et al., 2024).

A análise do armazenamento de carbono através do uso de imagens de satélite e dados hiperespectrais da vegetação tem se mostrado não apenas viável, mas altamente eficaz, demonstrando um potencial significativo para estimativas precisas da absorção do carbono (Sun et al., 2018). Os métodos relacionados ao sensoriamento remoto têm tido uma importância fundamental na análise das características e comportamentos da vegetação em variadas dimensões espaciais e temporais (Silva et al., 2021). À medida que cresce a

disponibilidade de dados espectrais de alta resolução, o sensoriamento remoto tem emergido como um instrumento crucial e indispensável para a estimativa da biomassa florestal e do sequestro de carbono, oferecendo ferramenta valiosas para a gestão sustentável dos recursos naturais (Hilker et al., 2007; Sun et al., 2018).

A espectrorradiometria utilizada em campo, uma técnica consolidada e amplamente utilizada em diversas aplicações operacionais, exerce uma função essencial na avaliação das condições do ambiente, na modelagem de processos naturais, na calibração de sensores orbitais e aerotransportados, entre outras funcionalidades (Meneses, Almeida, Baptista, 2019). As observações baseadas em dados hiperespectrais têm contribuído significativamente para um entendimento mais abrangente da fenologia das plantas, fornecendo informações detalhadas sobre os padrões de crescimento, desenvolvimento e saúde das plantas (Silva et al., 2021). No entanto, é fundamental que os observadores realizem uma análise cuidadosa da heterogeneidade espacial dos pontos de análise, levando em consideração a variabilidade das características da vegetação ao longo do espaço e do tempo, essa abordagem meticulosa permite uma interpretação mais precisa e confiável dos dados, maximizando assim o valor das informações obtidas por meio das técnicas de sensoriamento remoto (Krofcheck et al., 2015).

Em meio ao atual cenário de crescente vulnerabilidade ambiental e preocupações agravadas pelas mudanças climáticas globais, as estimativas de sequestro de carbono assumiram um papel de importância crítica no âmbito do manejo florestal e na formulação de políticas ambientais (Higuchi, 1998). À medida que os impactos das atividades humanas no meio ambiente se tornam mais evidentes e severos, compreender e monitorar o sequestro de carbono torna-se não apenas crucial, mas imperativo para a implementação de medidas eficazes de conservação e mitigação das mudanças climáticas. Portanto, é crucial explorar de que maneira a estrutura da vegetação está intrinsecamente relacionada à dinâmica do sequestro de carbono. Esta análise mais detalhada das características das espécies dominantes e de sua distribuição vertical não apenas enriquecerá nossa compreensão dos processos de sequestro de carbono, como também para o desenvolvimento de estratégias de manejo florestal sustentável e conservação ambiental.

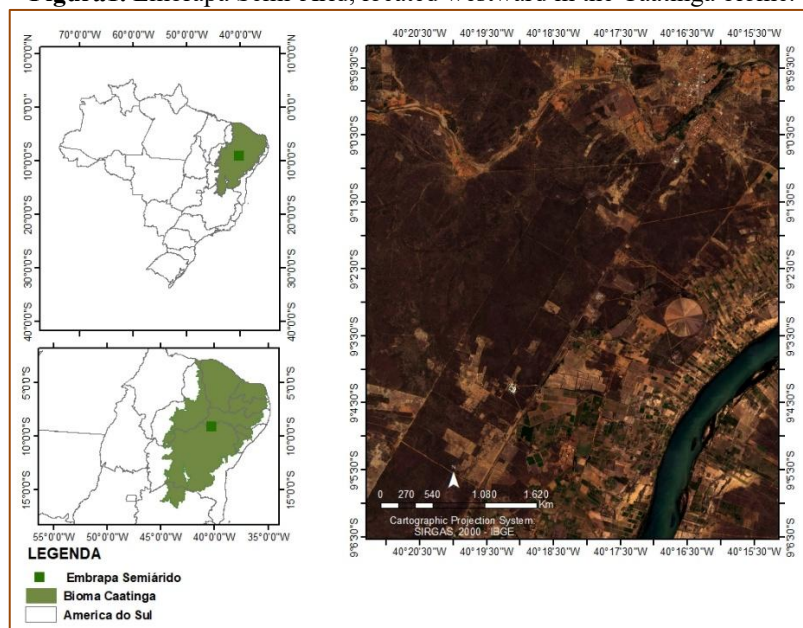
Considerando o atual quadro ambiental, este estudo tem como objetivo avaliar a estimativa da Produtividade Primária Bruta (GPP) e da Produtividade Primária Líquida (NEE) em quatro espécies vegetais predominantes do bioma Caatinga, com o propósito de aprofundar a compreensão da relação entre a estrutura da vegetação e a dinâmica do sequestro de carbono.

2. Material e Métodos

2.1 Delimitação e caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Semiárido, está situada no extremo oeste (08° 30' 54"; 41° 0' 18", 522 m.), Fig.1, apresenta vegetação de Caatinga preservada, o clima da região é classificado como semiárido segundo a classificação de Köppen, com chuvas concentradas entre os meses de novembro a abril e uma precipitação pluviométrica média anual de 578 mm (Alvares et al., 2013).

Figura 1. Embrapa Semiárido, a oeste no bioma caatinga.
Figura1. Embrapa Semi-Arid, located westward in the Caatinga biome.



Fonte: Elaborada pelas autoras (2024).

A temperatura do ar média anual é de 26,5°C, com uma evaporação anual de 2600 mm e uma umidade relativa média anual de 61% (Moura et al., 2007).

A vegetação é predominantemente composta por Caatinga hiperxerófila, com trechos de floresta caducifólia, predomina a Caatinga arbustiva-arbórea, intercalada com trechos de Caatinga arbustiva (Miranda et al., 2020; Silva et al., 2017). Os solos predominantes são os Neossolos, além dos Planossolos, e há pequenas áreas de solos desenvolvidos, como os Latossolos e Argissolos, entre outros (Silva et al., 2024).

Coleta e Processamento de Dados em Campo

As coletas de dados em campo foram meticulosamente conduzidas em uma área de caatinga preservada localizada na Embrapa Semiárido, situada no município de Petrolina. Esta área, designada como um Sítio de Pesquisas pela Embrapa Semiárido, desempenha um papel crucial na geração de informações fundamentais sobre o funcionamento dos ecossistemas brasileiros.

Durante a pesquisa, foi realizado um inventário detalhado em uma unidade amostral selecionada, composta por uma parcela de 400m². Utilizando o avançado equipamento FieldSpec® 4 Hi-Res, foram realizadas medições precisas em quatro espécies vegetais predominantes na área de estudo. Cada uma dessas espécies foi avaliada quanto à energia radiante da vegetação em três folhas distintas.

Todas as medições foram realizadas de forma sistemática, com a pistola de medição posicionada dentro da parcela designada. As quatro espécies alvo incluíram: (*Sapium argutum* (Müll. Arg. 1863) *Huber* da família *Euphorbiaceae*, *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa* (Vogel) Fortunato & Wanderlei (1986), *Samanea tubulosa* (Benth) Barneby & J.W. Grimes, (1996), *Jatropha mollissima* (Poli.) Bailona, da família *Euforbiaceae*). Essa abordagem detalhada e abrangente permitiu uma compreensão mais aprofundada das características e dinâmicas do ecossistema da caatinga, contribuindo assim para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação e manejo sustentável.

Modelos utilizado para estimar Produtividade Primária Bruta – GPP

Para a análise da Produtividade Primária Bruta, adotou-se a metodologia proposta por Moura et al., (2012) que utilizou o Índice de Diferença de Água e Vegetação (WDVI, na sigla em inglês) (Kerr e Pichon 1996) para compor a Produtividade Primária Bruta (GPP).

$$WDVI = \rho_{830} - 1,06 \times \rho_{660} \quad (1)$$

Onde: ρ_{830} é infravermelho próximo, -1,06 é a inclinação da reta do solo e ρ_{660} é a banda do vermelho

Conforme destacado por Moura et al. (2012), a relação entre o WDVI e a GPP obteve correlação substancialmente mais robusta entre o WDVI e GPP. Ademais, com base nesses achados, uma equação de ajuste foi desenvolvida para estimar a GPP em $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Eq. 2).

$$GPP = \frac{WDVI + 0,2782}{0,2137} \quad (2)$$

Esses resultados destacam a importância do WDVI como um indicador mais confiável para a estimativa da GPP, oferecendo assim estimativas valiosas para estudos futuros sobre dinâmicas ecofisiológicas e monitoramento de ecossistemas.

Modelos utilizado para estimar Produtividade Primária Líquida

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um índice amplamente utilizado em estudos de vegetação. É calculado pela diferença normalizada entre as refletâncias no infravermelho próximo (NIR) e no vermelho (Red), dividida pela soma das mesmas (Eq. 3).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (3)$$

Onde: refletância do infravermelho próximo ρ_{IV} e no vermelho ρ_V .

O PRI (Photochemical Reflectance Index) é um índice de vegetação sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem (Eq.4).

$$PRI = \frac{\rho_{IV} + \rho_V}{\rho_{IV} - \rho_V} \quad (4)$$

Onde: refletância do infravermelho próximo ρ_{IV} e no vermelho ρ_V .

Conforme a metodologia de Rahman et al. (2000), destaca-se a necessidade de reescalonar os dados do PRI para valores positivos, resultando em um novo índice denominado sPRI (Eq.5).

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (5)$$

Onde: PRI é o índice de vegetação sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides.

Os índices NDVI e sPRI foram combinados, segundo a metodologia de Rahman et al., (2000), neste estudo denominamos de *NEE* (Eq.6).

$$NEE = -5.6(NDVI * sPRI) - 0,69 \quad (6)$$

3. Resultados e Discussão

A contribuição do dossel e das espécies predominantes — *Sapium argutum*, *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa*, *Samanea tubulosa* e *Jatropha mollissima* — possibilitou análises mais detalhadas sobre o sequestro de carbono na Caatinga, especialmente com o uso de equipamentos hiperespectrais de alta resolução, como o FieldSpec® 4 Hi-Res. Esses dispositivos permitem medições precisas da reflectância da vegetação, fornecendo subsídios robustos para a estimativa da Produção Primária Bruta (GPP) e da Produtividade Primária Líquida (NEE), conforme discutido por Silva et al. (2021).

Os modelos espectrais desenvolvidos a partir de dados espectrorradiométricos permitem identificar diferentes assinaturas espectrais das plantas, refletindo variações em sua estrutura, composição bioquímica e estado fisiológico (Galvêncio et al., 2013; Manjunath et al., 2014; Meneses, Almeida & Baptista, 2019; Silva et al., 2021). A utilização de instrumentos hiperespectrais tem se mostrado eficaz para aprimorar a compreensão dos processos biofísicos da vegetação, além de fornecer observações mais acuradas da fenologia das espécies (Miranda et al., 2020).

No presente estudo, observou-se que o incremento total de carbono pelas quatro espécies analisadas superou significativamente a produtividade média estimada para o dossel da Caatinga, que foi de 1,79 g C m⁻² d⁻¹ para a GPP e 1,72 g C m⁻² d⁻¹ para a NEE (Tab. 1).

Tabela1. Resumo dos valores de Produtividade Primária Bruta (GPP) e Produtividade Primária Líquida (NEE) do dossel e das quatro espécies dominantes na área de estudo na Embrapa Semiárido Petrolina.

Table 1. Summary of Gross Primary Productivity (GPP) and Net Ecosystem Exchange (NEE) values for the canopy and the four dominant species in the study area at Embrapa Semi-Arid Petrolina.

Espécie	GPP (g C m ⁻² d ⁻¹)	NEE (g C m ⁻² d ⁻¹)
<i>Sapium argutum</i>	3,47	2,84
<i>Bauhinia forficata</i>	3,14	2,44
<i>Samanea tubulosa</i>	3,54	2,64
<i>Jatropha mollissima</i>	2,96	2,56
Dossel	1,79	1,72

Fonte: Elaborada pelas autoras (2024).

Ambas as produtividades demonstraram contribuições semelhantes. Tal evidência destaca o papel ecológico relevante dessas espécies dominantes como importantes sumidouros de carbono, sobretudo em um bioma marcado por condições ambientais severas. Conforme apontado por Moura et al. (2017), os processos

de análise espectral voltados à compreensão do comportamento dos dosséis ainda representam um desafio, especialmente no que se refere à quantificação dos ciclos fenológicos em escalas espaciais ampliadas. A redução parcial ou total da folhagem interfere diretamente na reflectância dos dosséis, afetando a precisão das estimativas espectrais e, por consequência, as interpretações sobre os fluxos de carbono.

A espécie *Sapium argutum* (Müll. Arg.) Huber, da família Euphorbiaceae, dentre as quatro analisadas, foi a que mais estocou carbono nos valores do NEE no ano de 2017, com $3,47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ do GPP e $2,84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o NEE. Observa-se que os valores do GPP foram superiores aos do NEE (Tab. 1). Na área de estudo correspondente a 400 m^2 , foram identificados 14 indivíduos. *Sapium argutum*, conhecida popularmente como burra leiteira, possui porte arbóreo que pode atingir de 5 a 10 metros de altura. Suas características morfológicas incluem um tronco bastante ramificado e folhas elípticas, com margens denteadas, medindo de 5 a 12 cm de comprimento por 2 a 6,7 cm de largura, sustentadas por finas hastes de 1 a 3 cm de comprimento, apontando para cima, assemelhando-se a “orelhas de burro” (Fig. 2).

Figura 2. *Sapium argutum* (Müll. Arg.) A, Ramo floral, B, Estames C, Vista externa dos frutos D, Ovários, E, Ramo de folhas.

Figure 2. *Sapium argutum* (Müll. Arg.) A, Floral branch, B, Stamens C, External view of fruits D, Ovaries, E, Leafy branch.



Fonte: http://plantillustrations.org/species.php?id_species=905592

No estudo conduzido por Moreira et al. (2006), foi possível calcular a fitomassa disponível em matéria seca (MS, kg ha^{-1}) na espécie *S. argutum*, sendo $0,36 \text{ kg MS ha}^{-1}$ em torno de 7,81 indivíduos. O estudo realizado no município de Petrolina, Pernambuco, na área experimental da Embrapa Semiárido, conduzido por Lima Júnior et al. (2014), indicou a espécie *S. argutum* como predominante na área, com um valor de importância de 2,23. A espécie burra leiteira apresentou uma biomassa de $0,92 \text{ t ha}^{-1}$.

Dessa forma, destaca-se a relevância ecológica de *Sapium argutum* no contexto do sequestro de carbono, uma vez que sua elevada taxa de assimilação líquida de carbono (NEE), aliada ao porte arbóreo e à presença

expressiva na área de estudo, contribui significativamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Sua capacidade de absorver e fixar carbono atmosférico reforça o potencial da espécie como aliada em estratégias de restauração florestal e manejo sustentável, especialmente em ambientes de clima semiárido.

A espécie *Samanea tubulosa* (Benth) Barneby & J.W. Grimes apresentou um aumento significativo no estoque de carbono durante o período de avaliação, absorvendo da atmosfera $3,54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de GPP e registrando o maior valor de GPP entre as espécies estudadas no ano de 2017, além de apresentar $2,64 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de NEE (Tab. 1). *S. tubulosa*, pertencente à família Fabaceae (Leguminosae), subfamília Mimosoideae, é popularmente conhecida como “sete-cascas”. Trata-se de uma árvore decídua no inverno, monoica e pioneira, que pode atingir até 28 metros de altura e 100 cm de diâmetro à altura do peito (DAP).

Suas folhas são alternas, compostas bipinadas, com pecíolo e raque tomentosos de até 28 cm de comprimento, contendo de 2 a 5 pares de pinas, que podem medir até 20 cm. Os folíolos, dispostos em pares e bicompostos, podem chegar a 10 pares por pina, apresentando comportamento sensitivo, fechando-se durante a noite e em dias nublados (Lopes et al., 1987) (Fig. 3).

Figura 3. *Samanea tubulosa* (Benth) A, Ápice de uma inflorescência. B, Folhas com capítulos lameliformes axilares pareados. C, Fruto. D, Vista interna do fruto e sementes. E, Vista parcial do epicarpo. F, Bráctea. G, Flor central. H-I, Flores laterais.

Figure 3. *Samanea tubulosa* (Benth) A, Apex of an inflorescence. B, Leaves with paired lamelliform axillary capitula. C, Fruit. D, Internal view of the fruit and seeds. E, Partial view of the epicarp. F, Bract. G, Central flower. H-I, lateral flowers.



Fonte: <http://www.arvores.brasil.nom.br/new/setecascas/>
<http://sites.unicentro.br/wp/manejoflorestal/11869-2/>
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0011-67932011000100012

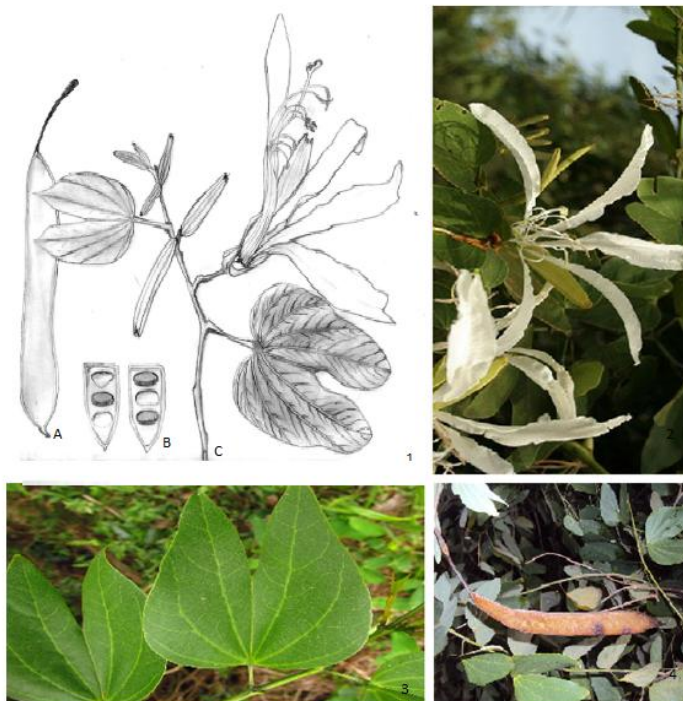
A distribuição geográfica da espécie na área de estudo revelou a presença de 23 indivíduos em uma área total de 400 m². Em contraste, outras regiões do Brasil apresentam menor densidade populacional da espécie. No estudo de Cardoso et al. (2016), por exemplo, foram identificados apenas quatro indivíduos às margens do rio Mucuri, no município de Nanuque, MG.

Diante desses dados, evidencia-se o papel ecológico de *Samanea tubulosa* no sequestro de carbono atmosférico, especialmente em ambientes tropicais e subtropicais. Sua elevada produtividade primária bruta (GPP) e sua estrutura arbórea de grande porte contribuem para sua eficácia como sumidouro de carbono. Assim, a espécie se apresenta como um importante aliado em programas de reflorestamento, recuperação de áreas degradadas e ações voltadas à mitigação das mudanças climáticas.

A espécie *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa* incrementou o estoque de carbono durante o período de avaliação, absorvendo da atmosfera 3,14 g C m⁻² d⁻¹ de GPP e 2,44 g C m⁻² d⁻¹ de NEE (Tab. 1). Na área de estudo, foram registrados 9 indivíduos da espécie. *B. forficata* subsp. *pruinosa* (Vogel) Fortunato & Wunderlin, pertencente à família Fabaceae, é conhecida popularmente como pata-de-vaca. Trata-se de uma árvore decídua de médio porte, perene, que pode atingir até 8 metros de altura. Seu caule apresenta ramos frágeis, pendulares, glabros ou pubescentes, com acúleos gêmeos localizados na axila foliar. As folhas são compostas por dois folíolos soldados, formando uma estrutura que simula uma folha simples em forma de pata — característica que justifica o nome popular da espécie. Medem entre 8 e 12 cm de comprimento por até 6 cm de largura, possuem disposição alterna, limbo liso e brilhante na face superior, e glândulas basais evidentes (Fig. 4).

Figura 4. *Baunilha forficata*, **A**, Fruto fechado. **B**, Fruto aberto, vista interna do fruto e sementes. **C**, Parte do ramo com flores laterais e folhas.

Figure 4. *Baunilha forficata*, **A**, Closed fruit. **B**, Open fruit, internal view of the fruit and seeds. **C**, Part of the branch with lateral flowers and leaves.



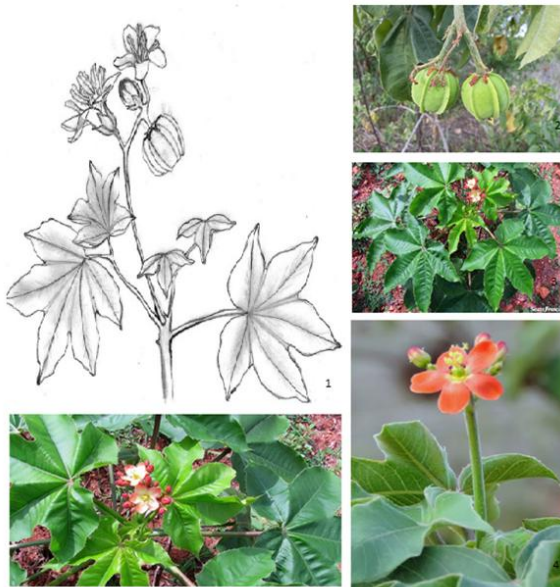
Fonte: http://www.plantillustrations.org/illustration.php?id_illustration=14236&SID=0&mobile=0&code_category_taxon=0&size=1

O estudo conduzido por Rocha et al. (2017) destacou a presença de *B. forficata* e a relevância dos indivíduos localizados no Parque Natural Municipal Flor do Ipê para estimativas de biomassa vegetal. Complementarmente, a pesquisa de Bianco (2015), que teve como objetivo a quantificação do sequestro de carbono por espécies arbóreas dominantes na área urbana de Londrina, PR, identificou 35 indivíduos de *B. forficata*, sendo considerada a espécie mais abundante entre os espécimes de porte médio (10,84%). A capacidade de incorporação de carbono estimada foi de 267,69 kg por árvore. Esses dados evidenciam o papel funcional da espécie *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa* como sumidouro de carbono, mesmo em ambientes urbanos ou fragmentados. Sua presença contribui para a melhoria da qualidade ambiental e reforça sua importância em projetos de arborização urbana, recuperação de áreas verdes e estratégias de mitigação das mudanças climáticas por meio da vegetação nativa.

A contribuição da espécie *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill. para a redução do carbono atmosférico foi expressiva, com valores de 2,96 g C m⁻² d⁻¹ de GPP e 2,56 g C m⁻² d⁻¹ de NEE estocado ao longo do período avaliado (Tab. 1). Na área de estudo, foram registrados 12 indivíduos. *J. mollissima*, pertencente à família *Euphorbiaceae* e popularmente conhecida como pião-bravo, é uma espécie nativa do Nordeste brasileiro, adaptada a condições ambientais extremas, caracterizadas por elevada evapotranspiração e baixo potencial hídrico (Arruda et al., 2004). A morfologia da espécie inclui caule aéreo ereto, do tipo tronco, com formato cilíndrico e consistência sublenhosa. Por apresentar altura inferior a cinco metros, *J. mollissima* é classificada como arbusto ramificado, com brotações geralmente situadas entre 50 cm e 1 metro acima do solo, assumindo uma conformação semelhante à de uma árvoreta (Fig. 5). Suas folhas são alternas, completas, com limbo apresentando venação palminérvea, conforme descrito por Vasconcelos et al. (2014).

Figura 5. *Jatropha mollissima*. 2- Fruto verde. 3- Inflorescência. 4- Inflorescência com flor única aberta mostrando os estames.

Figura 5. *Jatropha mollissima*. 2- Green fruit. 3- Inflorescence. 4- Inflorescence with single open flower showing the stamens.



Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-33062008000100013

A ampla distribuição geográfica da espécie é evidenciada em diversos estudos. Souza et al. (2015), por exemplo, identificaram 46 indivíduos de *J. mollissima* em uma área de 50 m × 2 m no município do Cariri,

PB. Moreira et al. (2006) também observaram sua dominância na estação experimental de Serra Talhada, ressaltando sua contribuição para a absorção de carbono na vegetação da Caatinga.

Considerando seu desempenho nos parâmetros de GPP e NEE, bem como sua resiliência em ambientes semiáridos, *Jatropha mollissima* revela-se uma espécie estratégica para projetos de recuperação de áreas degradadas e para ações de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, especialmente em regiões suscetíveis à desertificação.

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam o relevante papel ecológico de espécies nativas da Caatinga na dinâmica do ciclo do carbono, com destaque para *Samanea tubulosa*, *Sapium argutum*, *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa* e *Jatropha mollissima*. As elevadas estimativas de Produtividade Primária Bruta (GPP) e Produtividade Primária Líquida (NEE) observadas para essas espécies, em comparação ao dossel médio da vegetação local, indicam sua contribuição significativa para o sequestro de carbono atmosférico, mesmo sob condições ambientais limitantes (Silva et al., 2024).

A constatação de que essas espécies funcionam como importantes sumidouros de carbono reforça a necessidade de sua conservação, mas também aponta para a urgência da implementação de estratégias que superem o paradigma da preservação passiva. Nesse sentido, torna-se imperativo o desenvolvimento de planos de manejo florestal sustentáveis, que articulem conservação ambiental, promoção da biodiversidade e geração de benefícios socioeconômicos.

Estudos recentes corroboram essa abordagem, ao demonstrarem que a manutenção da vegetação nativa em especial das florestas estacionais secas, é essencial para a mitigação das mudanças climáticas, não apenas por sua função de sequestro de carbono, mas também por sua contribuição à estabilidade climática, à segurança hídrica e à resiliência dos ecossistemas (Costa et al., 2023; Jesus et al., 2023).

Ademais, o manejo das espécies de alto valor ecológico pode fomentar práticas produtivas sustentáveis, como sistemas agroflorestais, extrativismo de produtos não madeireiros e ecoturismo comunitário. Tais práticas, ao integrar natureza e economia, favorecem a inclusão de populações locais e tradicionais nos processos de gestão territorial, fortalecendo a justiça ambiental e o desenvolvimento endógeno (Arruda et al., 2004; Bianco, 2015).

O uso de tecnologias hiperespectrais, como a espectrorradiometria de campo, revelou-se instrumental na análise dos fluxos de carbono, permitindo estimativas mais precisas e espacialmente detalhadas da GPP e da NEE. Conforme demonstrado por Silva et al. (2021), essas ferramentas são eficazes para o monitoramento contínuo das condições vegetacionais, possibilitando diagnósticos mais robustos sobre a eficiência fotossintética e a saúde das espécies florestais. Tais informações são fundamentais para o delineamento de estratégias de conservação e restauração em áreas vulneráveis à desertificação e à degradação.

Dessa forma, é possível afirmar que a articulação entre conservação ativa, manejo ecológico e uso de tecnologias de monitoramento representa uma via promissora para enfrentar os desafios socioambientais que incidem sobre o bioma Caatinga. A constituição de paisagens multifuncionais, baseadas em espécies nativas de alto desempenho ecológico, constitui um caminho viável e necessário para promover a convivência sustentável entre natureza, sociedade e economia no Semiárido brasileiro.

4. Conclusão

Diante dos resultados obtidos, evidencia-se que espécies nativas da Caatinga desempenham um papel relevante na dinâmica do carbono, mesmo em condições ambientais adversas. A capacidade diferenciada de sequestro de carbono entre as espécies analisadas reforça a importância da diversidade vegetal para a estabilidade e funcionalidade dos ecossistemas semiáridos.

Espécies como *Samanea tubulosa*, *Sapium argutum*, *Bauhinia forficata* subsp. *pruinosa* e *Jatropha mollissima* apresentaram desempenho superior ao do dossel médio da vegetação local, destacando-se como

potenciais aliadas em programas de restauração ecológica, reflorestamento e mitigação das mudanças climáticas.

A aplicação de modelos espectrais demonstrou ser uma ferramenta eficiente na estimativa de fluxos de carbono, contribuindo para o monitoramento ambiental e para o planejamento de ações voltadas à conservação e uso sustentável da Caatinga. Assim, compreender e valorizar o papel dessas espécies na fixação de carbono é essencial para o desenvolvimento de estratégias integradas de gestão ambiental no contexto dos biomas brasileiros.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco-FACEPE pelo auxílio financeiro junto ao Edital de número 27/2015, processo nº: BPF-0162-5.02/23. À Embrapa Semiárido pela disponibilização dos dados de campo. Ao laboratório de sensoriamento remoto e geoprocessamento - SERGEO, e a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

6. Referências

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Arruda, F. P., Lira, M. A., Santos, M. V. F. dos, & Ferreira, R. L. C. (2004). Produção de biomassa e fixação de carbono de espécies da Caatinga. *Embrapa Semiárido*.

Bianco, R. (2015). **Estimativa da incorporação de carbono em biomassa arbórea em três trechos da arborização urbana de Londrina-PR** Monografia de Bacharelado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cardoso, D. S., Viana, V. N., & Silva, S. de O. (2016). Levantamento florístico da vegetação ciliar do rio Mucuri no perímetro urbano do município de Nanuque/MG. *Enciclopédia Biosfera*, 13, 1637–1648. <https://doi.org/10.18677/Enciclopedia>

Costa, G., Silva, C., Mendes, K. R., Rodrigues, T. R., Silva, J. B., Dalmagro, H. J., Nunes, H., Gomes, A., Silva, G., Batalha, S., Marinho, L., Almeida, G., Viana, L., & de Oliveira, D. P. L. (2023). The relevance of maintaining standing forests for global climate balance: A case study in Brazilian forests. *Intech*, i(Tourism), 17.

de Moura, Y. M., Galvão, L. S., Hilker, T., Wu, J., Saleska, S., do Amaral, C. H., Nelson, B. W., Lopes, A. P., Wiedeman, K. K., Prohaska, N., de Oliveira, R. C., Machado, C. B., & Aragão, L. E. O. C. (2017). Spectral analysis of Amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and MODIS observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.006>

Galvêncio, J. D., Moura, M. S. B., Silva, T. G. F., Silva, B. B., & Naue, C. R. (2013). LAI improved to dry forest in semiarid of Brazil. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3, 132–136. <https://doi.org/10.14355/ijrsa.2013.0304.04>

Embrapa. (2018). **Futuro da agricultura brasileira** (p. 212). <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da->

agricultura-brasileira

Gomes, V. P., Galvêncio, J. D., Moura, M. S. B., Ferreira, P. dos S., Paz, Y. M., & Miranda, R. de Q. (2016). Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome Caatinga susceptibility to climate change. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 9(4), 1122–1136. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160111>

Higuchi, N. (1998). Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, 28(2), 153–166. <http://www.scielo.br/pdf/aa/v28n2/1809-4392-aa-28-2-0153.pdf>

Hilker, T., Coops, N. C., Nesic, Z., Wulder, M. A., & Black, A. T. (2007). Instrumentation and approach for unattended year-round tower-based measurements of spectral reflectance. **Computers and Electronics in Agriculture**, 56(1), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.003>

Jesus, J. B. de, Kuplich, T. M., Barreto, Í. D. de C., & Gama, D. C. (2023). Dual polarimetric decomposition in Sentinel-1 images to estimate aboveground biomass of arboreal Caatinga. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 29, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100897>

Jiang, Y., Zhang, J., Xu, X., & Dong, Z. (2013). A GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 23, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.015>

Krofcheck, D. J., Eitel, J. U. H., Lippitt, C. D., Vierling, L. A., Schulthess, U., & Litvak, M. E. (2015). Remote sensing-based simple models of GPP in both disturbed and undisturbed Piñon-Juniper woodlands in the Southwestern U.S. **Remote Sensing**, 8(1), 20. <https://doi.org/10.3390/rs8010020>

Lima Júnior, C. de, Accioly, L. J. de O., Giongo, V., Lima, R. L. F. de A., Sampaio, E. V. de S. B., & Menezes, R. S. C. (2014). Estimativa de biomassa lenhosa da Caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, 42(102), 289–298.

Liu, Z., Wang, L., & Wang, S. (2014). Comparison of different GPP models in China using MODIS image and ChinaFLUX data. **Remote Sensing**, 6(10), 10215–10231. <https://doi.org/10.3390/rs61010215>

Lopes, M. A., Magnavaca, R., Filho, A. F. C. B., & Gama, E. E. G. (1987). Avaliação de populações de milho e seus cruzamentos para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 22, 257–263.

Ma, S., Baldocchi, D., Wolf, S., & Verfaillie, J. (2016). Slow ecosystem responses conditionally regulate annual carbon balance over 15 years in Californian oak-grass savanna. **Agricultural and Forest Meteorology**, 228–229, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.016>

Manjunath, K. R., Kumar, A., Meenakshi, M., Renu, R., Uniyal, S. K., Singh, R. D., Ahuja, P. S., Ray, S. S., & Panigrahy, S. (2014). Developing spectral library of major plant species of Western Himalayas using ground observations. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, 42(1), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0305-0>

Miranda, R. de Q., Nóbrega, R. L. B., Moura, M. S. B., Raghavan, S., & Galvêncio, J. D. (2020). Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. *International Journal of*

Applied Earth Observation and Geoinformation, 85, 101992. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>

Moreira, J. N., Lira, M. D. A., Santos, M. V. F. dos, Ferreira, M. D. A., Araújo, G. G. L. de, Ferreira, R. L. C., & Silva, G. C. da. (2006). Caracterização da vegetação de Caatinga e da dieta de novilhos no Sertão de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41(11), 1643–1651. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100011>

Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., Silva, B. B. da, Machado, C. C. C., Silva, H. A. da, & Oliveira, T. H. de. (2012). Gross primary production using related vegetation indices. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 7004(11).

Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., Brito, L. T. de L., Souza, L. S. B., Sá, I. I. S., & Silva, T. G. F. da. (2007). **Clima e água de chuva no Semiárido**. Em Embrapa Semiárido. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159649/1/OPB1515.pdf>

Meneses, P. R., Almeida, T., & Baptista, G. M. de M. (2019). **Reflectância dos materiais terrestres: Análise e interpretação**.

Rocha, W. D. O., Pereira, A. M., Silva, A. E. da, & Fraga, J. A. (2017). Estimativa de biomassa vegetal e sequestro de carbono no Parque Natural Municipal Flor do Ipê, Várzea Grande, MT. **Multitemas**, 22(51). <https://doi.org/10.20435/multi.v22i51.1284>

Silva, J. N. B. da, Galvêncio, J. D., Miranda, R. de Q., & Moura, M. S. B. (2021). Modelos da produtividade primária bruta em área de floresta tropical sazonalmente seca, usando dados de reflectância da vegetação de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14(6), 3775–3784. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3775-3784>

Silva, J. N. B. da, Silva, J. L. B. da, Santos, A. M. dos, Silva, A. C. da, & Galvêncio, J. D. (2017). Índice de vegetação como subsídio na identificação de áreas com potenciais à desertificação. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 2(4), 358–367. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1469.358-367>

Silva, J. N. B., Galvêncio, J. D., Silva, J. L. B., Soares, G. A. S., & Silva, J. F. B. (2024). Análise da distribuição espacial dos fluxos de carbono no ecossistema da Caatinga. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, 123, 115–123.

Silva, J. N. B., Galvêncio, J. D., Silva, J. L. B., Soares, G. A. S., Tiburcio, I. M., & Barros, J. P. F. G. (2024). Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: Uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 93, 75–93.

Souza, L., Souza, L. S. B. de, Moura, M. S. B. de, Sedyama, G. C., & Silva, T. G. F. da. (2015). Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 8(1), 41–55.

Sun, Y., Frankenberg, C., Jung, M., Joiner, J., Guanter, L., Köhler, P., & Magney, T. (2018). Overview of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: Retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP. **Remote Sensing of Environment**, 209, 808–823. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.016>

Sun, Z., Wang, X., Yamamoto, H., Tani, H., Zhong, G., Yin, S., & Guo, E. (2018). Spatial pattern of GPP

variations in terrestrial ecosystems and its drivers: Climatic factors, CO₂ concentration and land-cover change, 1982–2015. **Ecological Informatics**, 46, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.06.006>

Vasconcelos, G. C. L., Fernandes, F. S., Amador, A. M., Amador, K. A. M., & Arriel, N. H. C. (2014). Caracterização morfológica de *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 9(3), 263–268.

Vilas, C., Macedo, G., Baptista, D. M., Moura, S. B., Barros, A., Jesus, W., Anna, S., & Fernandes, H. (2023). Validation of a spectral model for CO₂ fluxes estimation in areas of the Caatinga Biome. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 8(3), 226–239.