



REVISTA  
Casa da

ISSN 2316-8056

**GEOGRAFIA**  
de Sobral

# ESTIMATIVA TEMPORAL E ESPACIAL DO DESEMPENHO DOS MODELOS DE REGRESSÃO CALIBRADOS PARA OS FLUXOS DE CARBONO EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA DE CAATINGA

Temporal and spatial estimate of the performance of calibrated regression models for carbon fluxes in a seasonally dry tropical forest area of caatinga

Estimación temporal y espacial del desempeño de modelos de regresión calibrados para flujos de carbono en un área de bosque tropical estacionalmente seco de caatinga

 <https://doi.org/10.35701/rcgs.v26.975>

Joélia Natália Bezerra da Silva<sup>1</sup>

Josiclêda Domiciano Galvêncio<sup>2</sup>

Rodrigo de Queiroga Miranda<sup>3</sup>

Magna Soelma Beserra de Moura<sup>4</sup>

## Histórico do Artigo:

Recebido em 05 de setembro de 2023

Aceito em 08 de abril de 2024

Publicado em 15 de abril de 2024

## RESUMO

Os ecossistemas terrestres desempenham um papel fundamental no ciclo global do carbono, mitigando os efeitos do aquecimento global. Estudos da troca de energia nos ecossistemas fornecem informações importantes para a compreensão dos fluxos de CO<sub>2</sub> nos sistemas ambientais. Este estudo tem por objetivo estimar a Produção Primária Bruta, a Produtividade Primária Líquida e a Respiração do Ecossistema no Bioma Caatinga frente às mudanças climáticas. Foram obtidas medições e foi realizada a caracterização climática do período de 2015 a 2019 a fim de verificar se os fluxos de carbono acompanharam a sazonalidade climática da região. Os resultados apontaram que os valores médios dos fluxos foram condizentes com os padrões climáticos. Foi avaliado a variação

<sup>1</sup> Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Email: joelia.silva@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0002-2106-5933>

<sup>2</sup> Professora titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0001-7367-6587>

<sup>3</sup> Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Email: rodrigorazeayres@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5464-2397>

<sup>4</sup> Pesquisadora na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Semiárido. E-mail: magna\_upa@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2844-1399>

dos fluxos de carbono diário associados as variáveis ambientais, assim também o uso e cobertura do solo para todo o domínio da Caatinga. Foram utilizados modelos a partir das faixas espectrais observadas em campo e verificadas as estimativas para diferentes ecorregiões da Caatinga. Observou-se que as áreas de altitudes (Complexo Ibiapaba-Araripe e a Chapada Diamantina) obtiveram valores mais altos de GPP, Reco e NEE, e a Depressão Sertaneja Meridional obteve valores baixos entre os anos de 2015 e 2019.

**Palavras-chave:** Caatinga. Sensoriamento Remoto. Sazonalidade. Mudanças Climáticas.

#### ABSTRACT

Terrestrial ecosystems play a crucial role in the global carbon cycle, mitigating the effects of global warming. Studies of energy exchange in ecosystems This study aims to estimate Gross Primary Production, Net Primary Productivity, and Respiration of the Ecosystem in the Caatinga Biome in the face of climate change. Measurements were obtained, and the climate characterization of the period from 2015 to 2019 was carried out to verify whether the carbon fluxes followed the climatic seasonality of the region. The results showed that the average values of the flows were consistent with the weather patterns. The variation of daily carbon fluxes associated with environmental variables and land use and cover for the entire Caatinga domain were evaluated. Models were used from the spectral bands observed in the field, and the estimates for different ecoregions of the Caatinga were verified. It was observed that the altitude areas (Complexo Ibiapaba-Araripe and Chapada Diamantina) obtained higher values of GPP, Reco, and NEE, and Depressão Sertaneja Meridional obtained low values between the years 2015 and 2019.

**Keywords:** Caatinga. remote sensing. seasonality. Climate changes.

#### RESUMEN

Los ecosistemas terrestres desempeñan un papel clave en el ciclo global del carbono, mitigando los efectos del calentamiento global. Los estudios del intercambio de energía en los ecosistemas proporcionan información importante para comprender los flujos de CO<sub>2</sub> en los sistemas ambientales. Este estudio tiene como objetivo estimar la Producción Primaria Bruta, la Productividad Primaria Neta y la Respiración del Ecosistema en el Bioma Caatinga ante el cambio climático. Se obtuvieron mediciones y se realizó la caracterización climática del período 2015 a 2019 para verificar si los flujos de carbono siguieron la estacionalidad climática de la región. Los resultados mostraron que los valores promedio de los caudales fueron consistentes con los patrones climáticos. Se evaluó la variación de los flujos diarios de carbono asociados a variaciones ambientales, así como el uso y cobertura del suelo para todo el dominio Caatinga. Se utilizaron modelos a partir de bandas espectrales observadas en campo y verificadas como estimaciones para diferentes ecorregiones de la Caatinga. Cabe señalar que las zonas de altitud (Complexo Ibiapaba-Araripe y Chapada Diamantina) obtuvieron valores más altos de GPP, Reco y NEE, y la Depressão Sertaneja Meridional obtuvo valores bajos entre los años 2015 y 2019.

**Palabras llave:** Caatinga. Detección remota. Estacionalidad. Cambios climáticos.

## INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres desempenham um papel fundamental no ciclo global do carbono, devido a sua importância como sumidouros de dióxido de carbono que tem como potencialidade mitigar os efeitos do CO<sub>2</sub> antropogênicos (FERREIRA et al., 2020; SILVA et al., 2024). A vegetação é um dos principais elementos da biosfera (LIU et al., 2021) sendo responsável pela avaliação e funcionamento da atividade fotossintética bem como pelas trocas de carbono entre os ecossistemas e a atmosfera (GUAN et al., 2022; LIU et al., 2021).

A produtividade da vegetação, baseado nos fluxos de energia e carbono, reflecte rigorosamente a informação da mudança da vegetação, tornando-se um dos principais elementos

ecossistêmicos, está relacionado as trocas de CO<sub>2</sub> que tem sido amplamente observado em várias escalas temporais e espaciais (NOGUEIRA et al., 2019; BIJDES et al., 2021). Os fluxos de carbono compreendem à Produtividade Primária Bruta (GPP), refere-se à quantidade de carbono orgânico fixada pelos corpos vegetais, à Produtividade Primária Líquida (NEE) é representada pela taxa global de fotossíntese onde a matéria orgânica utilizada na respiração é convertida na assimilação total, a respiração do ecossistema – (Reco), consiste em um processo no qual as plantas oxidam carboidratos e liberam dióxido de carbono, água e energia na forma de calor (RODDA et al. 2022; BAI et al. 2022; FLORES – RENTERÍA et al. 2023).

As condições meteorológicas afetam fortemente os fluxos de água e carbono do ecossistema através do controle da transpiração, evapotranspiração do dossel bem como da produtividade do ecossistema que é impulsionada pela fotossíntese das plantas (OLIVEIRA et al., 2005). A marcante variabilidade da pluviometria em um mesmo ano na Região Nordeste associa-se a variações de padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre os oceanos tropicais, que perturbam a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico, tal como às anomalias de temperatura observadas no Oceano Pacífico, que resultam em anos com La Niña e/ou El Niño (MOURA et al., 2007; PEREIRA et al., 2020)

No Brasil, a região Semiárida (localizada na região Nordeste) é uma das mais impactadas pelas mudanças no clima (SILVA et al., 2017b; MENDES et al., 2020; LIMA, 2021; VIEIRA et al., 2022), caracterizado por temperaturas elevadas, baixa amplitude térmica anual e chuvas escassas e mal distribuídas, com longos períodos de seca (TABARELLI et al., 2018). A vegetação predominante nessa região, a Caatinga, tem sido bastante modificada ao longo do ano devido à sua acentuada variabilidade climática e ações antrópicas (SILVA et al., 2021; SILVA et al., 2017). O baixo índice pluviométrico e as altas temperaturas causam diversos problemas socioeconômico e ambientais, mas, em especial, as atividades antrópicas (ou seja, agricultura, queimadas, pastoreio, entre outros) tem fragilizado o ecossistema produzindo desequilíbrios ecológicos que são vulneráveis às mudanças climáticas globais (SILVA et al., 2017; TABARELLI et al., 2018; SÁ et al., 2021). Em particular, a Caatinga ainda retém uma grande extensão de floresta nativa embora tenha ocorrido a substituição da vegetação nativa à crescente expansão de terras agrícolas (Ferreira *et al.*, 2020). O ecossistema de Caatinga detém ampla heterogeneidade, nesse sentido Velloso et al. (2002) apontaram fatores climáticos, geomorfológicos, características da vegetação, influências sofridas pelos tipos de solo, pela disponibilidade hídrica, pela altitude e pelo relevo da região e indicaram a divisão de oito diferentes ecorregiões que possuem diferentes fitofisionomias, tornando-se Complexo de Campo Maior; Complexo Ibiapaba – Araripe; Depressão Sertaneja Setentrional; Planalto da Borborema; Depressão Sertaneja Meridional; Dunas

do São Francisco; Complexo da Chapada Diamantina e Raso da Catarina.

A dinâmica global do carbono em terras semiáridas é impulsionada principalmente por três variáveis climáticas: temperatura, precipitações, e a radiação em ondas curtas, no entanto, a pouca disponibilidade hídrica tende a ter um papel determinante na dinâmica do CO<sub>2</sub> devido à estimulação de organismos no solo, crescimento das plantas e a produtividade do ecossistema que os tornam suscetíveis à intensidade e frequência da precipitação (FLORES-RENTERÍA et al., 2023; SILVA et al., 2024).

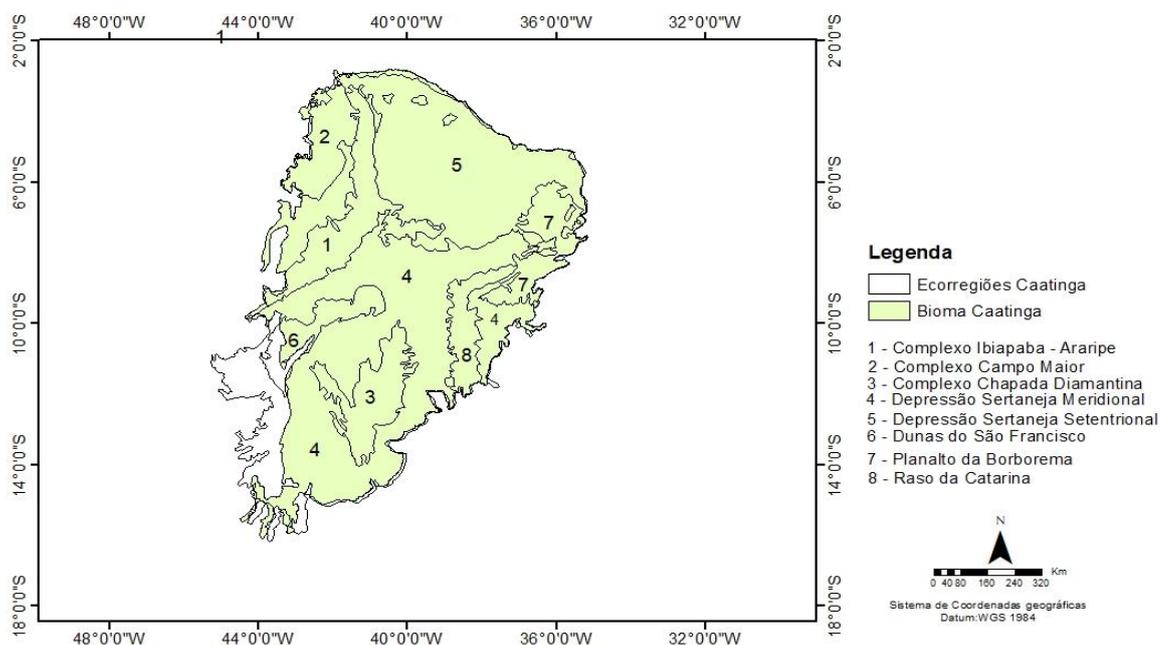
A análise da dinâmica do carbono dos ecossistemas em longos períodos de tempo é, portanto, uma questão aberta e desafiadora, que requer o uso de diferentes conjuntos de dados e métodos de simulação (LACERDA et al., 2020; SILVA et al., 2021). O conjunto de dados de sensoriamento remoto têm possibilitado observações em várias escalas e tem desempenhado um papel crescente no dimensionamento das medições das torres de fluxos para grandes áreas (LIU; CHEN; HAN, 2012). A presente pesquisa se propõe estimar o balanço do carbono no ecossistema da Caatinga por meio de modelos de regressão linear múltiplas calibrados para a vegetação de Caatinga, utilizando dados gerados a partir de imagens, que venham facilitar a análise das condições climáticas em diferentes áreas de florestas sazonalmente secas.

## METODOLOGIA

### *Delimitação e caracterização da área de estudo*

A área de estudo compreende a área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca, a Caatinga, localizada no semiárido brasileiro (Figura 1) sob a divisão de oito diferentes ecorregiões que possuem diferentes fitofisionomias, tornando-se Complexo de Campo Maior; Complexo Ibiapaba – Araripe; Depressão Sertaneja Setentrional; Planalto da Borborema; Depressão Sertaneja Meridional; Dunas do São Francisco; Complexo da Chapada Diamantina e Raso da Catarina (VELOSO et al, 2002). Na sua grade maioria, as vegetações consiste em formação lenhosa de porte médio e baixo, espécies espinhosas de folhas pequenas e finas, cactáceas e bromeliáceas (KILL, 2017). A altura média do dossel é de 4,5 m (MIRANDA et al., 2020). As espécies predominantes são *Poincianella microphylla*, *Mimosa tenuiflora* e *Manihot pseudoglaziovii*, *Commiphora leptophloea*, *Schinopsis brasiliensis*, *M. tenuiflora* (Kiill, 2017). Predominam-se os solos Argissolo vermelho-amarelo, Planossolo háplico e Vertissolo hidromórfico (LEAL, [s. d.]). O clima é semiárido (ALVORES et al., 2013), com a estação chuvosa entre janeiro e abril, com precipitação pluviométrica média anual de 578 mm; temperatura média anual de 26 °C; evaporação anual de 2000 mm e umidade relativa média anual de 60% (MOURA et al., 2007).

Figura 1: Ecorregiões da Caatinga, segunda a classificação de Veloso et al, 2002.



Fonte: Autores (2024).

### Obtenção e processamento de imagens orbitais

Nesta etapa foram obtidas todas as imagens dos sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Obtivemos os dados de refletância da superfície terrestre (MOD09GA) com base nas informações de latitude e longitude da floresta de Caatinga de janeiro a dezembro de 2015 a 2019.

MOD09GA: Utilizou-se a refletância da superfície do produto (MOD09) a partir do MODIS/TERRA satélite do sensor. Os dados foram adquiridos na página eletrônica *earthdata*, referente a quadrícula h14v9, foram adquiridas 12 cenas para a período de análise.

As séries temporais extraídas foram usadas com garantia de Qualidade / Controle de Qualidade (QA / QC), assegurando a qualidade do produto MOD09GA. O MOD09GA é composto por sete bandas com resolução de 1-2 dias, que possuem valores de refletância da superfície com 500 m de resolução espacial no visível ( $\rho_1 = 620\text{--}670\text{ nm}$ ;  $\rho_3 = 459\text{--}479\text{ nm}$ ;  $\rho_{34} = 545\text{--}565\text{ nm}$ ), infravermelho próximo ( $\rho_2 = 841\text{--}876\text{ nm}$ ;  $\rho_5 = 1230\text{--}1250\text{ nm}$ ), e infravermelho médio ( $\rho_6 = 1628\text{--}1652\text{ nm}$ ;  $\rho_7 = 2105\text{--}2155\text{ nm}$ ).

### **Obtenção de dados climáticos**

Dados climáticos foram obtidos por equipamentos instalados em uma torre micrometeorológica localizada em uma área de reserva legal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa – Petrolina/PE. O sítio é equipado com sensores eletrônicos para a quantificação dos componentes do balanço de radiação, energia e carbono. Na Caatinga, a torre possui aproximadamente 16m de altura, com dois sistemas de medidas, um de baixa frequência, para medição dos componentes do balanço de radiação (CNR1 Net radiometer, Kip & Zonen, B.V. Delft Netherlands), temperatura e umidade relativa do ar (HMP45, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e precipitação (CS700-L, Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália). Foram coletados dados de Temperatura do ar média mensal (°C), umidade relativa do ar (%), radiação global (MJ m<sup>2</sup>) déficit de pressão de vapor (kPa) e Precipitação pluviométrica (mm) para o período de 2015 a 2019.

### **Análise espacial e temporal dos fluxos de carbono**

Os fluxos de carbono foram relacionados às variáveis climáticas coletados na torre micrometeorológica localizada na Embrapa Semiárido, para os anos de 2015 a 2019. Foram utilizadas bases digitais para obtenção dos tipos de uso e ocupação da terra.

Os mapas anuais de cobertura e uso do solo do MapBiomas são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat. Todo processo é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (machine learning) através da plataforma Google Earth Engine que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem. Para esse estudo utilizou-se a coleção 5 disponível em: <https://mapbiomas.org/>.

Foram utilizados os modelos de Silva (2022) para a estimativa dos fluxos de carbono calibrados para a vegetação de Caatinga em  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  Representados pelas equações 1, 2 e 3 respectivamente:

$$\text{Reco} = 1,336 + (-30,631) \times \rho_{550} + 13,913 \times \rho_{775} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que,  $\rho_{550}$  e  $\rho_{775}$  são as reflectâncias nas faixas 550 nm e 775 nm, respectivamente

$$\text{NEE} = 1,611 + 13,180 \times \rho_{470} + (-5,913) \times \rho_{775} + 0,306 \times \text{Reco} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que,  $\rho_{470}$  e  $\rho_{775}$  são as reflectâncias nas faixas espectrais de 470 nm e 775 nm, respectivamente.

$$\text{GPP} = 0,284 + 1,947 \times \rho_{775} + (-5,598) \times \rho_{470} + 0,551 \times \text{Reco} + (-0,323) \times \text{NEE} \quad \text{Eq. (3)}$$

em que, Reco (unidade) é a respiração do ecossistema,  $\rho_{470}$ ,  $\rho_{775}$  são as reflectâncias no comprimento de onda de 470 nm e 775 nm, respectivamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variabilidade dos fluxos de carbono observada no domínio da Caatinga, foram influenciadas por fatores climáticos tais como a precipitação, temperatura e umidade do ar, que afetam a disponibilidade hídrica nas ecorregiões do bioma Caatinga.

A avaliação das variáveis meteorológicas encontra-se associada aos fluxos de carbono. Nestas, a variação da temperatura média do ar, a umidade relativa, a radiação global, o déficit de pressão de vapor e a precipitação média para os anos de 2015 a 2019, de acordo com as medições realizadas em área de Caatinga preservada apresentaram as variáveis meteorológicas condizentes aos fluxos de carbono estimados na região (Figura 2). No ano de 2015 a temperatura do ar obteve valor médio 27 °C (Figura 2 (A)) e o déficit de pressão de vapor médio foi de 1,91 kPa (Figura 2 (D)), a precipitação média 23,97 mm (Figura 2 (E)) umidade 51,7 % (Figura 2 (B)) e a radiação global foi de 22,32 MJ m<sup>2</sup> (Figura 2 (C)). Entretanto, no ano de 2019 a temperatura do ar obteve valor médio 26,88 °C (Figura 2 (A)) e o déficit de pressão de vapor médio foi de 1,84kPa (Figura 2 (D)) e a precipitação média 0,77 mm, Figura 2 (E)) umidade 52,4 % (Figura 2 (B)) e a radiação global foi de 21,60 MJ m<sup>2</sup> (Figura 2 (C)). Os fluxos de carbono para o ano de 2015 acompanharam a sazonalidade com GPP 0,43 – 8,50  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura, 4), Reco 0,35 – 7,62  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura, 6) e NEE -3,95 – 1,56  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura, 8).

A temperatura média do ar e a radiação global apresentaram padrão sazonal, a temperatura média obtiveram valores médios de 22 a 29°C podendo constar que no ano de 2015 e 2019 tivemos temperaturas médias de no máximo 29°C e no ano de 2017 obtivemos a menor média com 22°C (Figura 2 (A)). Neste sentido, os anos iniciaram com temperaturas altas, com média da ordem de 28 °C (Figura 2 (A)). No período chuvoso da região (janeiro-abril), foram registrados volumes de precipitação acumulada muito baixos da ordem de 30,54 mm, com total anual acumulado de 213,6 mm (Figura 13 (E)). A radiação solar, por outro lado, foi alta apresentando médias entre 15 MJ m<sup>2</sup> a 26 MJ m<sup>2</sup> (Figura 2 (C)), observa-se tendência à redução entre os meses de junho e julho para todos os anos de análise, quando se constata o início do inverno na região (Figura 2 (C)).

De modo geral, as temperaturas são muito elevadas na Caatinga associada a baixos índices de precipitação com alta insolação, resultou em alta demanda atmosférica (OLIVEIRA; SANTOS; MANZI, 2005).

Neste sentido, verificou-se a ocorrência de elevados valores do déficit de pressão de vapor atingindo valores médios máximos iguais a 2,83 e mínimos de 1,21, conseqüentemente, a umidade relativa média baixa com valores médios de 38% a 68% que influenciaram diretamente nos baixos fluxos de carbono para a região.

Vários autores evidenciam anomalias anuais dos fluxos de carbono na Caatinga estão associadas a eventos de severas secas durante os anos de El Niño Oscilação Sul (ENOS), com grandes impactos na dinâmica da vegetação nativa (PEREIRA et al., 2020; FERREIRA et al., 2020; MENDES et al., 2020).

Nos anos de 2014 e 2015 Mendes et al. (2020) observaram a distribuição mensal das variáveis meteorológicas medidas no site ESEC-Seridó (torre de fluxo), a precipitação média anual total foi de 513 mm e 466 mm, temperatura média 28,9 e 29,5 °C, a radiação solar anual recebida foi de 8030 e 8249 15 MJ m<sup>2</sup> e o déficit de pressão de vapor médio anual foi de 1,7 e 1,9 para os respectivos anos. Os autores evidenciam que as variáveis meteorológicas observadas durante o período experimental mostram condições extremamente secas no Nordeste do Brasil que está associada principalmente pelo acoplamento de uma fase quente do El Niño Oscilação Sul, particularmente em 2015, e anomalias positivas na temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte.

Pereira et al. (2020) demonstraram que a interação entre as temperaturas da superfície do oceano Pacífico e do Oceano Atlântico exerce forte influência no balanço de carbono da Caatinga do Nordeste do Brasil. De fato, o aquecimento do Atlântico Norte tropical parece ser suficiente para causar uma redução nos saldos dos fluxos de carbono, portanto, diminuir a assimilação de carbono da vegetação da Caatinga, potencialmente contribuindo para uma mudança no orçamento de carbono.

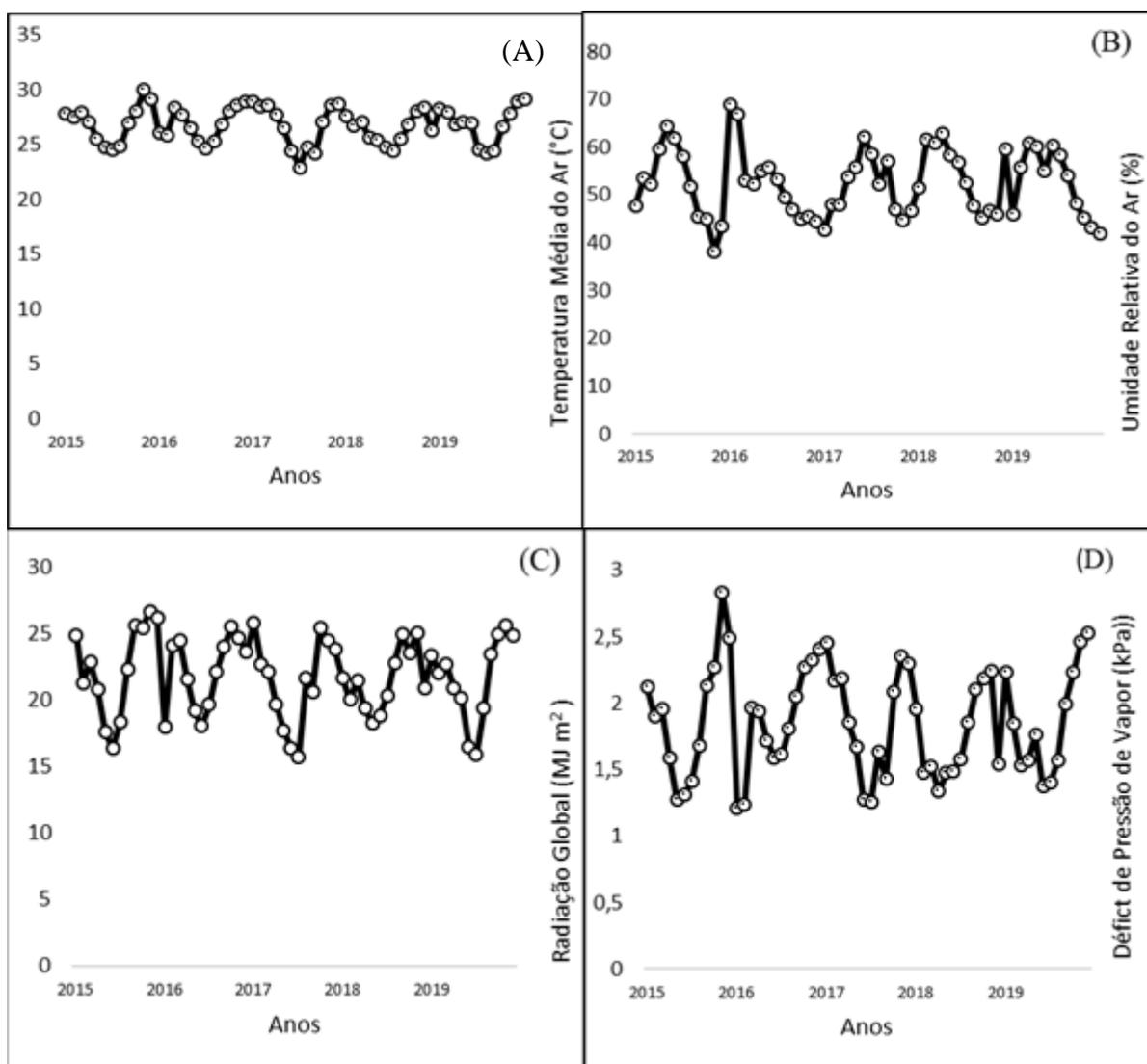
Ferreira et al. (2020) avaliaram a acurácia do GPP estimado por sensoriamento remoto no bioma Caatinga, utilizando conjunto dados observados recuperados de torres micrometeorológicas equipadas com sistemas de covariância turbulenta, foram usados para validar os dados de sensoriamento remoto, os autores utilizaram dados observados medidas no site ESEC-Seridó, em que a temperatura média foi de 23,07 °C e o déficit de pressão de vapor médio foi de 16,67 hPa, a precipitação média 187,11 mm para o ano de 2014.

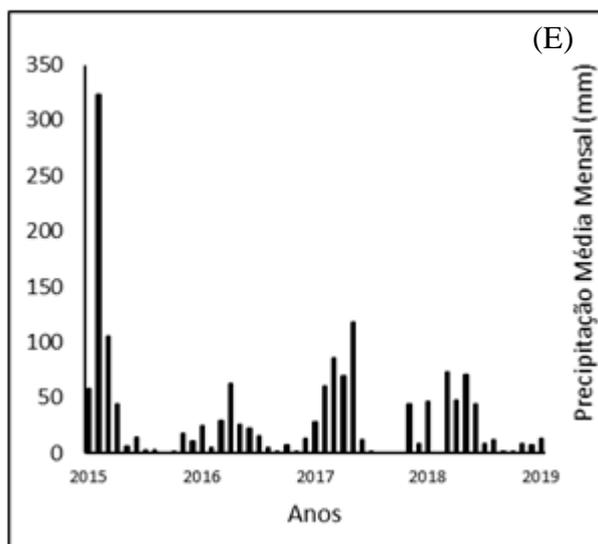
Para o ano de 2015 temperatura média foi de 23,29°C e o déficit de pressão de vapor médio foi de 18,75 hPa, a precipitação média 88,63 mm, a GPP para o ano de 2014 acompanhou a sazonalidade com 20,41 g CO<sub>2</sub> m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>, para o ano de 2015 a GPP houve uma diminuição em razão da precipitação ser menor.

Oliveira; Santos; Manzi (2006) evidenciaram a atuação de diferentes sistemas atmosféricos, como a atuação da Zona de Convergência Intertropical, Vórtices Ciclônicos destacaram que o principal sistema gerador de chuvas na região é a Zona de Convergência Intertropical, cuja posição de atuação e intensidade determinam a duração e intensidade da estação chuvosa.

No entanto, o efeito dessas secas na ciclagem do carbono muitas vezes não é bem compreendido pelos fatores ambientais levando a menos assimilação de carbono pela vegetação da Caatinga. Essa variabilidade na distribuição de água na região semiárida do Brasil, em decorrência da atuação de diferentes sistemas climáticos, determina a distribuição da umidade a qual é um fator determinante para as trocas de CO<sub>2</sub> entre o ecossistema e a atmosfera (OLIVEIRA; SANTOS; MANZI, 2006; FERREIRA et al., 2020; PEREIRA et al., 2020; MENDES et al., 2020).

**Figura 2:** Temperatura do ar média mensal °C (A), umidade relativa do ar % (B), radiação global MJ m<sup>2</sup> (C) déficit de pressão de vapor kPa (D) e Precipitação pluviométrica para o período de 2015 a 2019 medidos da torre micrometeorológica em área de Caatinga da Embrapa Semiárido.





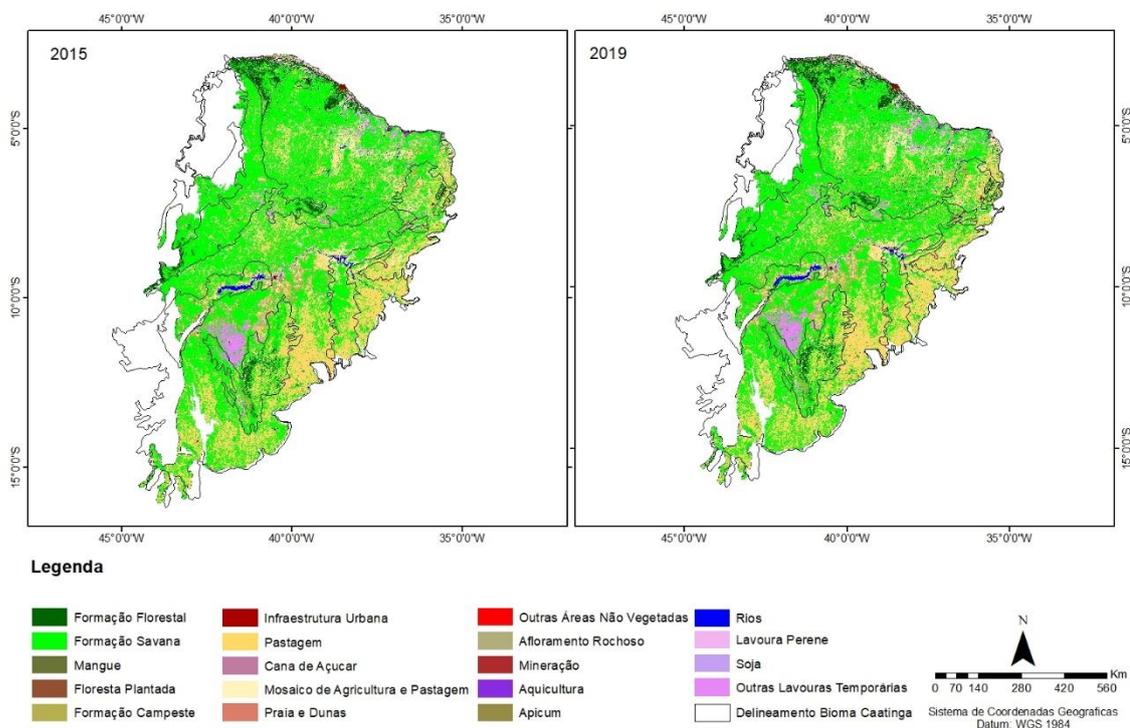
Fonte: Adaptado da Embrapa por autores (2024).

### ***Varição diária dos fluxos de carbono com uso e ocupação do solo nas ecorregiões da Caatinga***

Para observar a dinâmica dos fluxos de CO<sub>2</sub> nas ecorregiões da Caatinga, ocorridas em diferentes usos e coberturas das terras do domínio da Caatinga, entre os anos de 2015 e 2019 (Figura 3). Das 18 classes presentes na classificação de cobertura da terra das apenas três classes representam maior predominância, foram elas, formação de savanas, pastagens e agricultura.

Ao longo do período entre 2015 e 2019 não houve grandes mudanças no uso e cobertura da terra do ecossistema Caatinga, mas cabe destacar alguns aspectos relevantes. Primeiramente, a formação Savânica possuía áreas de 114.150.283km<sup>2</sup> no ano de 2015, no ano de 2019 113.211.144 km<sup>2</sup> é possível notar que houve redução da cobertura savânica com percentual de 0,8% entre os anos de análise. A cobertura classificada como Pastagem apresentou valores significativos, é possível notar que houve redução de 2,5% dessa classe dentro do período analisado, por outro lado, houve o aumento da classe de agricultura 7,5%. Sendo assim, pode-se verificar que as mudanças dos fluxos de carbono não foram tão significativas em relação ao uso e ocupação do solo no período de tempo analisado.

**Figura 3:** Classificação do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga, para os anos de 2015 e 2019, derivada do Mapbiomas, coleção 5, com pixel de 30x30m de resolução espacial.



Fonte: Autores (2024).

### ***Variação espacial e temporal da GPP nas ecorregiões da Caatinga***

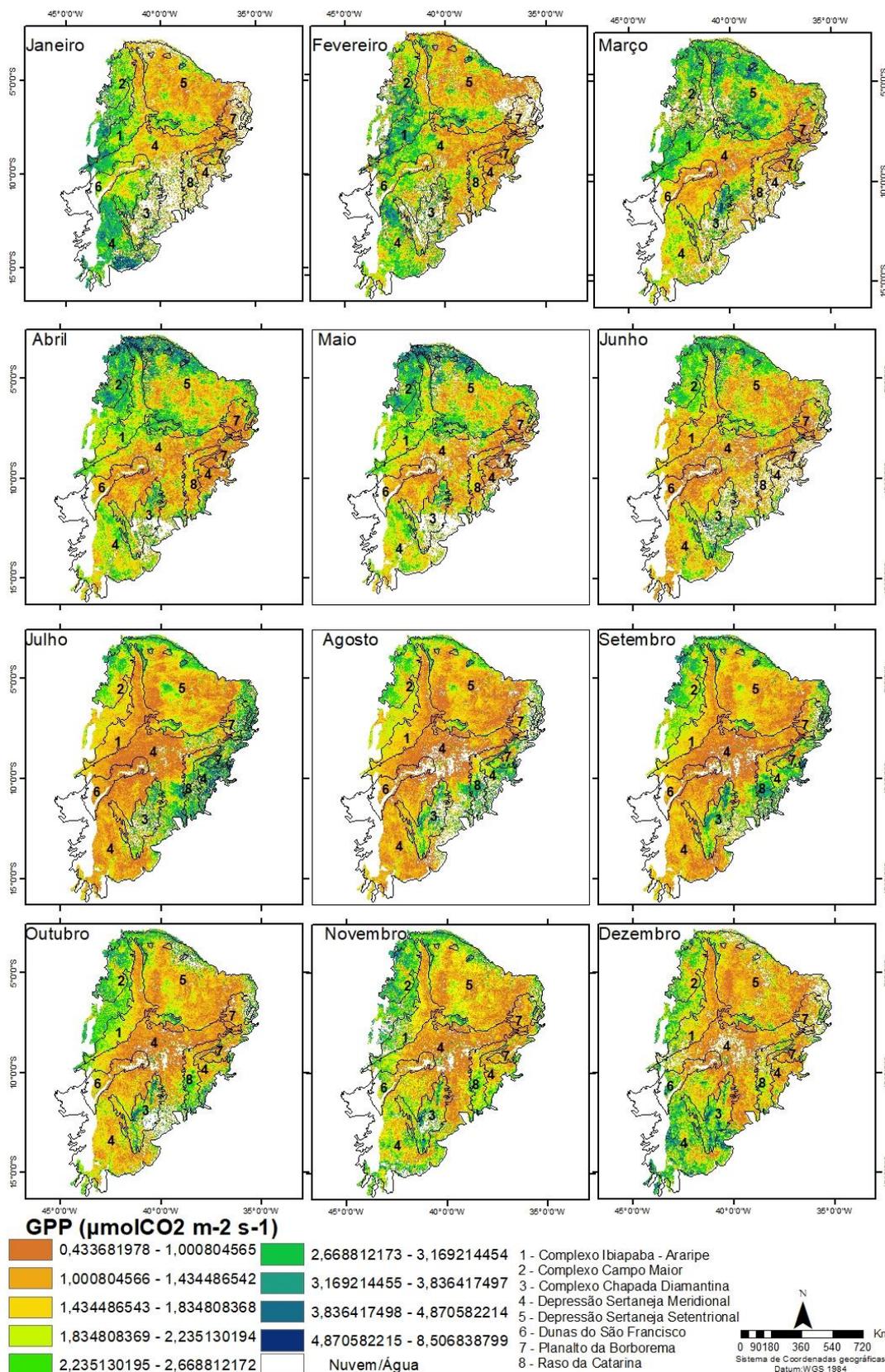
As áreas que apresentaram maiores valores de GPP para o ano de 2015 (Figura 4), corresponderam aos meses de Novembro a Maio, no Complexo Campo Maior, Complexo Ibiapaba –Araípe, Complexo Chapada Diamantina e a Depressão Sertaneja Meridional, os valores de GPP variaram na ordem de  $3,16 - 8,50 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , essas unidades ecorregionais possuem características físicas parecidas com exceção da Depressão Sertaneja que possui características particulares, clima quente e semiárido, com dois períodos chuvosos distintos principais de outubro a abril nas áreas de sertão e de janeiro a junho nas áreas de agreste com precipitação média anual varia de 500 a 800 mm, sendo que nas áreas mais altas ao sul da ecorregião pode ultrapassar 1.000 mm/ano, já as demais ecorregiões citadas possui áreas de altitudes mais elevadas, podemos constar as principais áreas de elevações como a Chapada do Araripe, Chapada Ibiapaba e a Chapada Diamantina, essas áreas, possuem altitudes médias entre 650 - 1.800 m, as precipitações médias de ordem 698 mm a 1200 mm, em áreas mais altas o índice pluviométrico tende a ser maior (Velloso; Sampaio; Pareyn, 2002). Podemos observar na Figura 4 que as áreas de maiores latitudes obtiveram maiores valores de GPP, em áreas elevadas, formam-se um microclima diferenciado do entorno, realizado por efeito orográfico, a pluviosidade é bastante superior à das áreas circunvizinhas, possibilitando temperaturas mais

baixas, e uma vegetação mais arbustiva densa (PÔRTO; CABRAL; TABARELLI, [s. d.]). No ano de 2019, os maiores valores foram observados na Depressão Sertaneja Setentrional e Planalto da Borborema, apesar do ano apresentar déficit hídrico, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) apresentou forte influência no regime das chuvas sobre as porções norte e leste, mais precisamente na porção norte da Depressão Sertaneja Setentrional e na porção leste do Planalto da Borborema, no mês de maio com valores variando entre  $3,16 - 8,50 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , os meses de novembro a maio de 2019 apresentaram valores baixos  $0,43 - 1,00 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , como observados na Depressão sertaneja Setentrional, Depressão Sertaneja Meridional e nas Dunas do São Francisco. No complexo maior entre os meses de fevereiro e março houve um aumento na GPP não muito simbólico de  $2,66$  a  $3,16 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . (Figura 5).

Os meses de Junho a Outubro de 2015 e 2019 foram caracterizados como seco (Figura 4 e 5) apresentaram redução na GPP influenciado pela baixa precipitação tendo registrado um acumulo de chuvas de  $14 \text{ mm}$  e  $0,96 \text{ mm}$  entre os meses citados no ano de 2015 e 2019 respectivamente, podemos observar nos anos de 2015 e 2019 que na Depressão Sertaneja Meridional os valores se mantiveram muito baixo com variações entre  $0,43 - 1,00 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto no ano de 2015 que os meses Janeiro, Fevereiro e Março foram observados fragmentos na região oeste da Depressão Sertaneja Meridional que registraram maiores valores de GPP na ordem de  $3,83 - 4,87 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , em 2019 a ecorregião Depressão Sertaneja Meridional apresentou valores na ordem de  $0,43 - 1,43 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para todo o ano. Em 2015, destacamos a porção norte do Complexo Campo maior e a Depressão Sertaneja Setentrional, que entre os meses de março a junho obtiveram valores de  $3,83 - 8,50 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  os valores podem estar associados a umidade vinda do oceano.

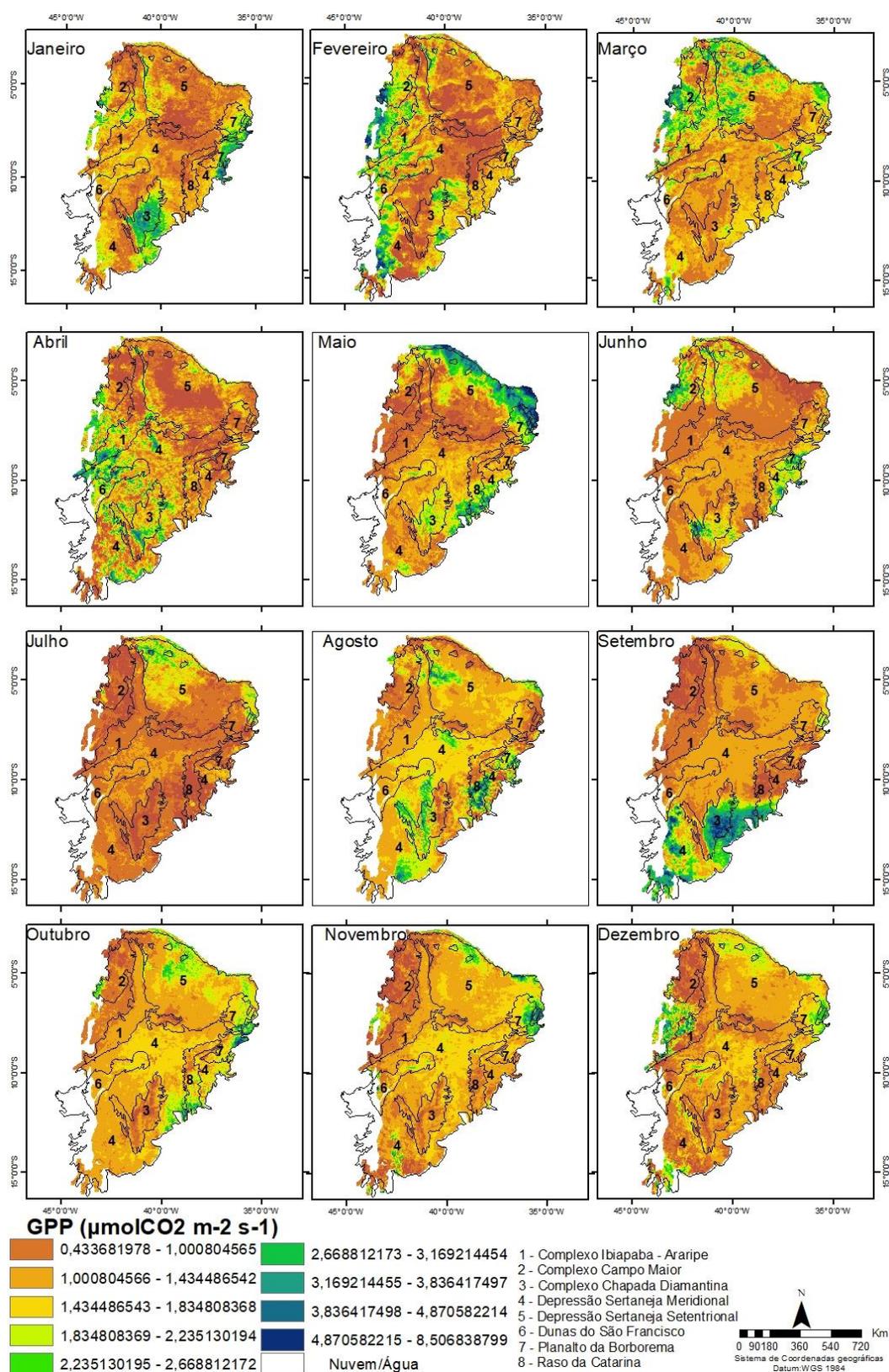
Nos meses mais secos, foi possível observar como a sazonalidade da precipitação pluviométrica ocasionou variações na GPP, com redução nos valores das médias, que foram evidentes a partir do mês de junho, com destaque nas ecorregiões da Depressão Sertaneja Meridional, Depressão Sertaneja Setentrional, Planalto da Borborema e Dunas do São Francisco, seguido dos valores estimados nos meses subsequentes com variações entre  $0,43$  a  $1,83 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Não podemos deixar de destacar o aumento da GPP no ano de 2015 em quase toda a porção leste do bioma Caatinga, que obteve altos valores referentes meses com menos precipitações, estão localizadas em áreas de transição de vegetação, as massas de ar quente vindas do oceano Atlântico atingem a região com menos força fazendo que provoque as chuvas orográficas (Figura 4). Cabe também evidenciar que no mês de setembro de 2019 o Complexo Chapada Diamantina obteve valores na ordem  $3,16 - 8,50 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , o evento de estiagem no ecossistema da a Caatinga em 2019, observou-se que houve uma diminuição na captura de GPP devido senescência a qual a vegetação foi condicionada (Figura 5).

Figura 4: Variação espacial e temporal da GPP na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2015.



Fonte: Autores (2024).

Figura 5: Variação espacial e temporal da GPP na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2019.



Fonte: Autores (2024).

### ***Varição espacial e temporal da Reco nas ecorregiões da Caatinga***

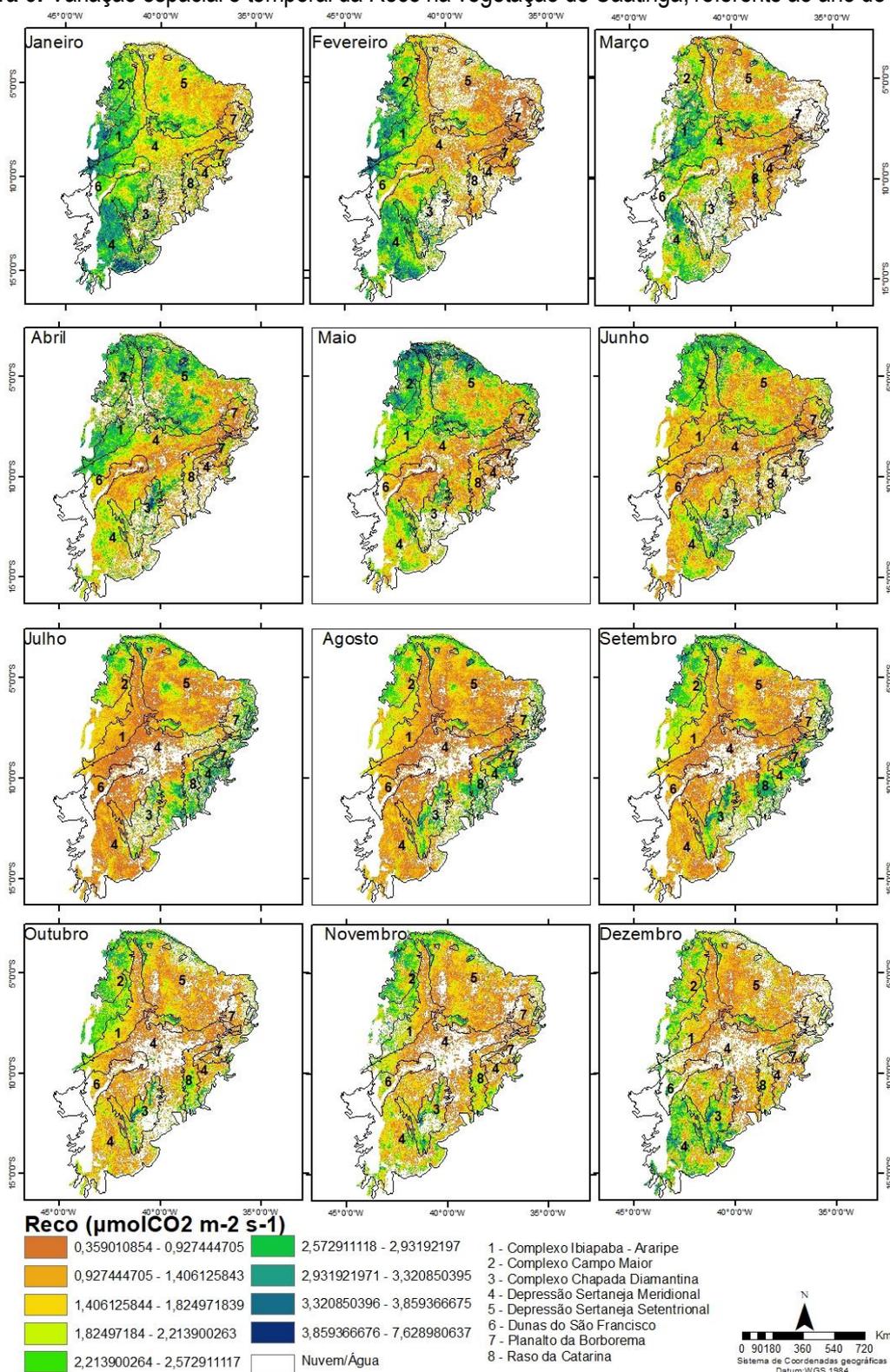
A Reco apresentou fluxos diários na ordem de 0,35 a 7,62  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para todo o domínio da Caatinga (Figura 6 e 7). As áreas que apresentaram maiores valores da Reco para o ano de 2015, foram nos meses de janeiro a maio, no Complexo Campo Maior, complexo Ibiapaba –Araripe, Complexo Chapada Diamantina e a Depressão Sertaneja Meridional na porção sul do bioma Caatinga. Os valores estimados obtiveram valores entre 1,82  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em poucos fragmentos e valores de 2,57 a 7,62  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em grande parte das ecorregiões citadas acima (Figura 6). Observou-se que no ano de 2019 a Reco obteve maiores valores nas porções do Planalto da Borborema e nos fragmentos do norte da Depressão Sertaneja Setentrional com valores entre 2,93 – 7,62  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 7).

Do mês de junho a novembro obtivemos valores baixos da Reco para os dois anos de análise, em 2015 e 2019 esses meses tiveram índices pluviométricos baixos, na ordem de 0,45mm 0,96mm (Figura 2 (E)) acumulado respectivamente, e altas temperaturas na ordem de 26,5 c° em 2015 e 26,7 c° em 2019 (Figura 2 (A)). É possível observar que no ano de 2015, nestes meses a Reco foi baixa variando entre 0,35 – 0,92  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , na região da Depressão Sertaneja Meridional, valores na ordem 0,35 - 2,57 na Depressão Sertaneja Setentrional com valores na ordem 0,35 - 2,57  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 6). É importante evidenciar que em todo o fragmento leste do bioma Caatinga nos meses de maiores precipitações a Reco foi baixa, já nos meses com menor índice pluviométrico a respiração foi maior. Esse comportamento condiz com estudos realizados em áreas áridas e semiáridas em vários sítios do planeta, a disponibilidade de água no solo impõe restrições aos ecossistemas e à respiração do solo (Jia *et al.*, 2020).O solo seco e úmido pode limitar a atividade da Reco, em condições seco limita a atividade das plantas e micróbios no solo, e o solo úmido, com alto teor de água pode limitar a Reco reduzindo a concentração de oxigênio no solo e, portanto, as taxas de respiração aeróbica dos organismos no solo (JIA *et al.*, 2020; FLORES-RENTERÍA *et al.*, 2023). O ano de 2019, nos meses secos as Recos obtiveram valores menores na Depressão Sertaneja Meridional, complexo Ibiapaba – Araripe e Dunas do São Francisco com valores de 0,433 – 1,43  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 7).

Em contrapartida, as áreas do Complexo Chapada Diamantina, Complexo Ibiapaba –Araripe, na região da Chapada do Araripe obtiveram valores de 2,93 a 7,62  $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para todo o ano de 2015. Os altos valores de respiração estão associados as altitudes da região, a modificação da vegetação em razão de maiores índices pluviométricos. O regime de precipitação habitual no ecossistema pode atuar como sumidouro ou fonte de CO<sub>2</sub> (Flores-Rentería *et al.*, 2023). O Reco, ou seja, componentes autotróficos e heterotróficos, é influenciado pelo tamanho e pulsos de precipitação, com a respiração microbiana

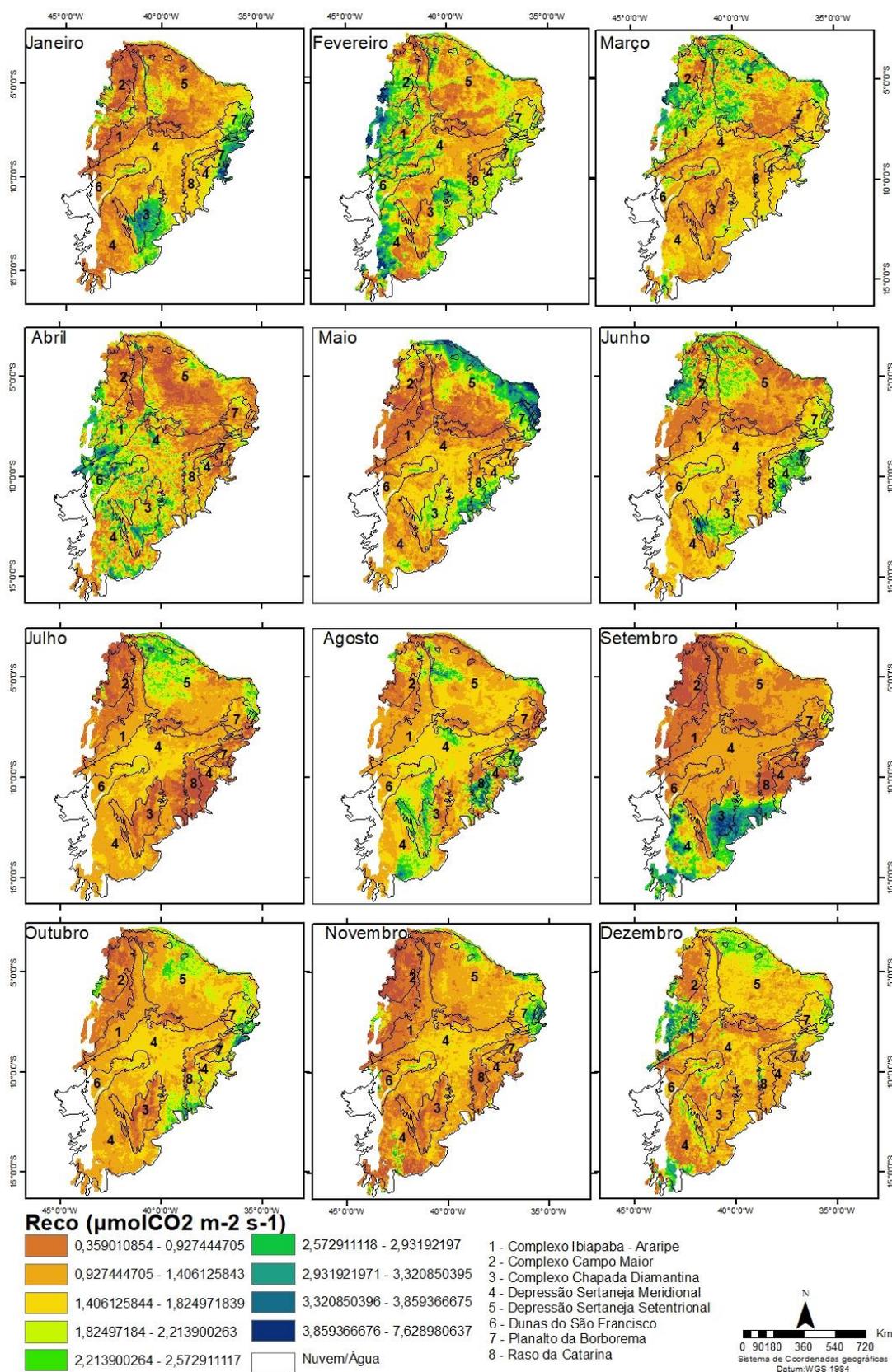
respondendo a eventos de precipitação pequenos ou moderados (JIA et al., 2020; FLORES-RENTERÍA et al., 2023).

**Figura 6:** Variação espacial e temporal da Reco na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2015.



Fonte: Autores (2024).

Figura 7: Variação espacial e temporal da Reco na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2019.



Fonte: Autores (2024).

### ***Varição espacial e temporal da NEE nas ecorregiões da Caatinga***

O NEE apresentou fluxos diários negativos e positivos na ordem de  $-3,95$  a  $1,56 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para todo o domínio da Caatinga (Figura 8 e 9). Os valores positivos indicam emissão de  $\text{CO}_2$  para atmosfera, esse comportamento está relacionado a baixa disponibilidade hídrica resultante do baixo volume pluviométrico para os anos analisados.

No período de maior escassez hídrica no ano de 2015, entre os meses de junho a outubro, destacamos que poucas áreas se comportaram como emissor de  $\text{CO}_2$ , as ecorregiões que emitiram dióxido de carbono foi o complexo Chapada Diamantina, Planalto da Borborema e Raso da Catarina (Figura 8). As formações vegetais que ocorrem no complexo Chapada Diamantina, nas matas de altitudes que ocorrem a partir de 1000 m, há predominância de florestas úmidas classificadas como Florestas ombrófilas, nestas áreas de maior altitude o  $\text{CO}_2$  foi emitido com valores de  $0,30 - 1,56 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 8). Nas áreas mais altas, do Planalto da Borborema, na região da encosta leste, prevalecem as vegetações tropical e de floresta, com clima úmido e obtive valores de  $0,30 - 0,63 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 8). No Raso da Catarina as áreas de altitudes, variam de 400 a 600 m na parte sul Bahia que possui vegetação predominantemente arbustiva, muito densa e menos espinhosa, possui maior precipitação no Sul, os valores de NEE variaram entre  $0,27 - 0,30 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  entre os meses de agosto e setembro. A partir dessas observações é possível relacionar os resultados da emissão do  $\text{CO}_2$  com base nas classes do relevo encontradas nas ecorregiões (Figura 8). No ano de 2019, as ecorregiões que foram emissores de  $\text{CO}_2$  no período seco, foram, Planalto da Borborema, Complexo Chapada Diamantina, e Raso da Catarina (Figura 9).

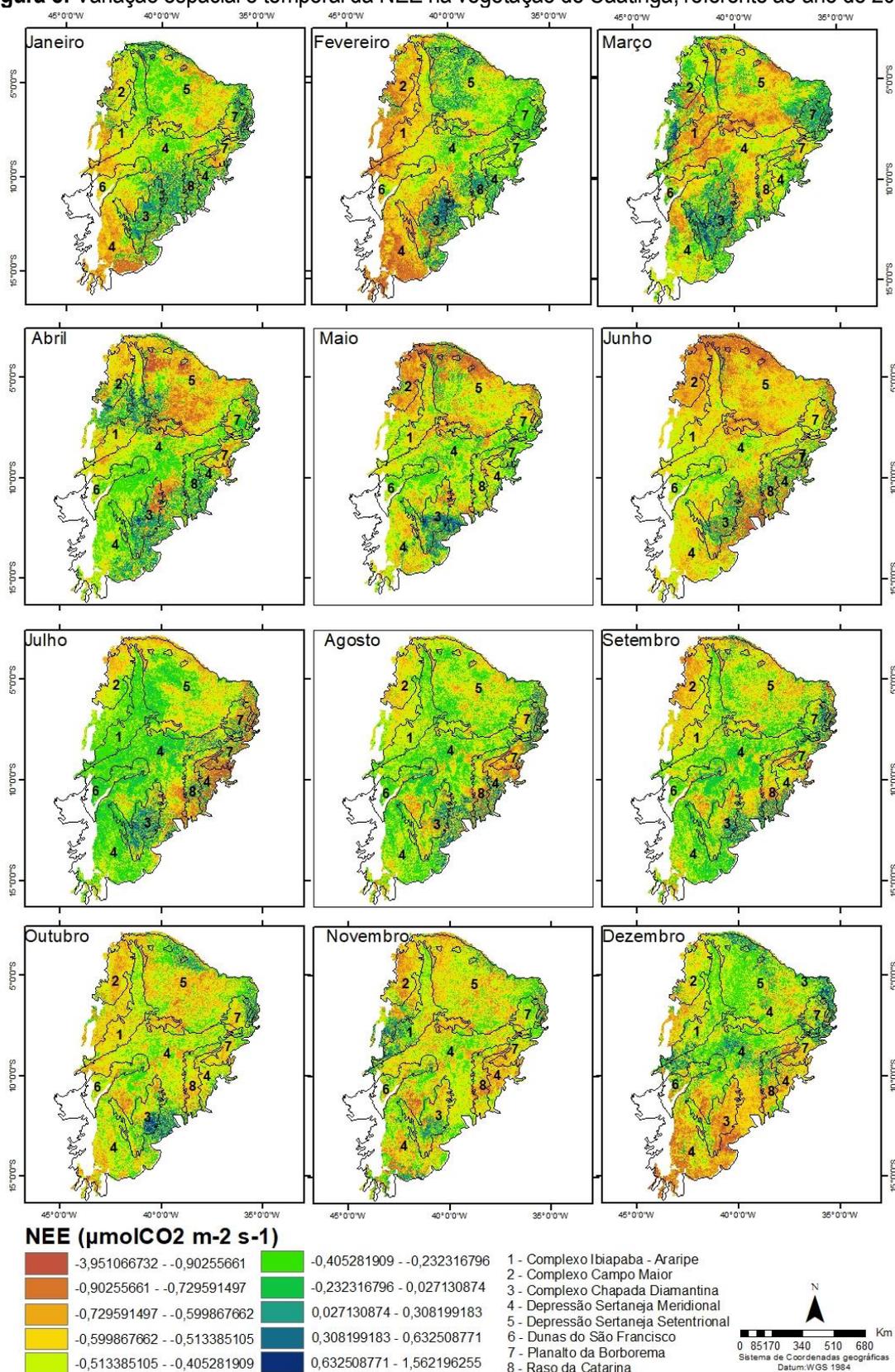
A NEE negativo atua como sumidouro de  $\text{CO}_2$ , a análise indica que, de modo geral, o NEE diminuiu, ou seja, tornou-se mais negativo, o que significa sumidouro mais forte com valores entre  $-3,95$  a  $-0,23 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Podemos observar que entre os meses de novembro a abril, considerado o período úmido em grande parte das ecorregiões, a NEE comportou-se como pouco sumidouro, com valores menos significativos, com predominância de valores entre  $-0,59$  a  $-0,40 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , principalmente nas áreas do complexo Ibiapaba – Araripe, complexo Chapada Diamantina com exceção para o mês de setembro de 2019, Planalto da Borborema, Depressão Sertaneja Meridional e Raso da Catarina (Figura 9).

Já nos meses secos, entre os meses de maio a outubro é possível notar a vegetação se comportando como sumidouros mais fortes, nos meses de maio e junho é notório que foram meses que mais sequestraram o carbono da atmosfera em especial o mês de junho de 2015 em áreas do Complexo Campo Maior e a Depressão Sertaneja Setentrional, os valores nestas áreas variaram entre  $-3,95 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a  $-0,59 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Em 2015, nos meses de julho a setembro houve predominância em quase todo o domínio da Caatinga na classe de  $-0,40$  a  $-0,59 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , destacando áreas do Complexo Ibiapaba –

Araripe, Depressão Sertaneja Meridional e Setentrional e o Planalto da Borborema. Em contrapartida, o ano de 2019, obteve valores mais significativos nos meses de setembro no Complexo Campo Maior, em julho na Depressão Sertaneja Meridional e Setentrional com valores estimados em  $-3,95$  a  $-0,92 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

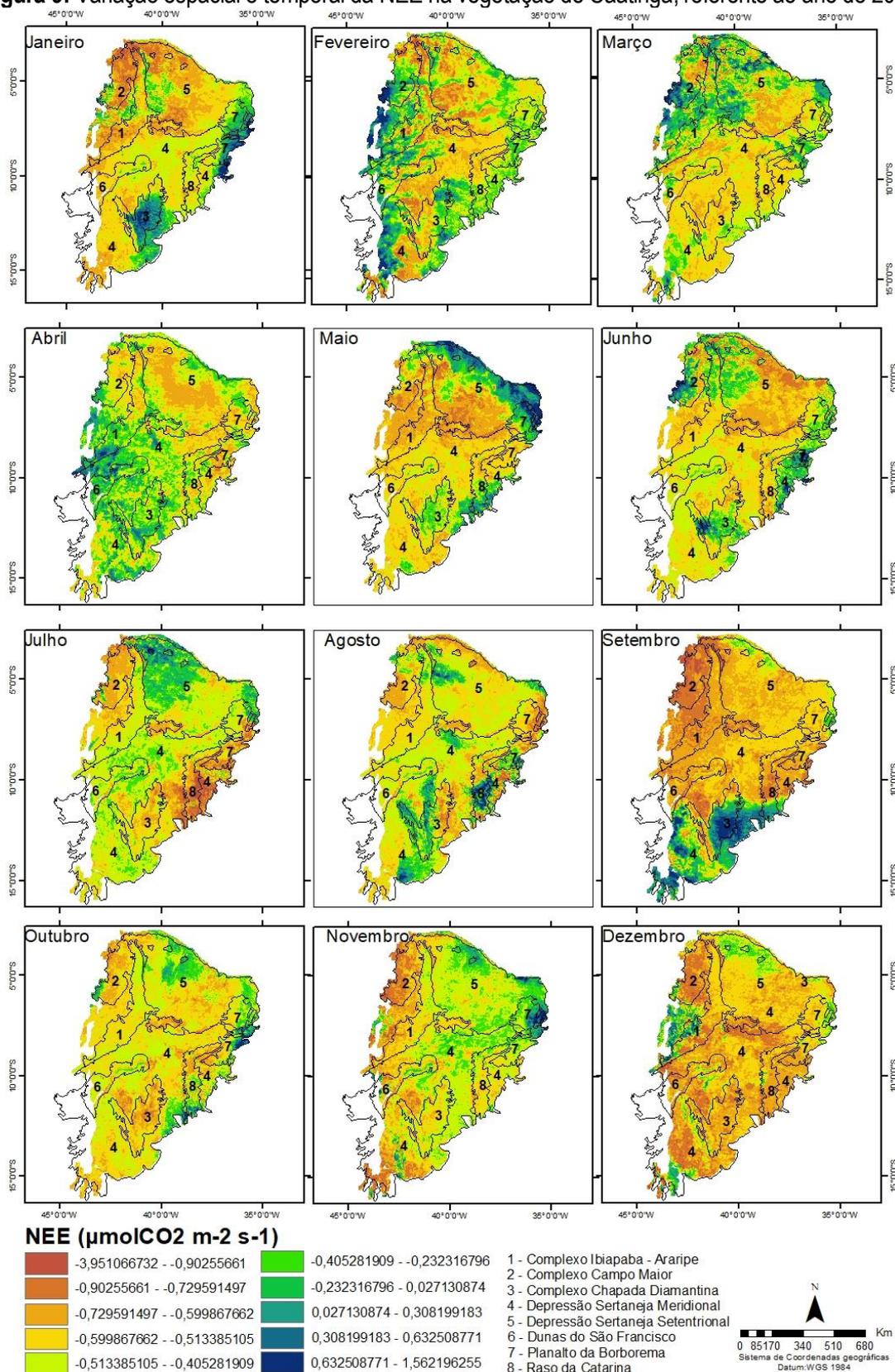
Em particular, a troca de carbono em florestas decíduas é influenciada não apenas pela meteorologia, mas também pelos estágios fenológicos, incluindo a senescência foliar, que podem variar em tempo e duração entre os anos e alterar as propriedades de troca entre o dossel e a atmosfera (Rodda *et al.*, 2021).

Figura 8: Variação espacial e temporal da NEE na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2015.



Fonte: Autores (2024).

Figura 9: Variação espacial e temporal da NEE na vegetação de Caatinga, referente ao ano de 2015.



Fonte: Autores (2024).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que, no que se refere à variação espaço-temporal do sequestro de carbono, as variáveis climáticas foram condizentes ao padrão sazonal da região e as estimativas dos fluxos de carbono. No tocante do uso e ocupação do solo ao longo do período entre 2015 e 2019 não houve grandes mudanças, sendo possível notar redução da cobertura savânica na ordem de 0,8% as pastagens apresentou uma redução de 2,5% e o aumento de 7,5% na classe de agricultura.

Os modelos de fluxos de carbono calibrados para as condições climáticas da vegetação de Caatinga, utilizados neste estudo, foram eficazes, e estimaram bem tanto no período chuvoso, quanto no seco, observou-se que as áreas de altitudes (Complexo Ibiapaba-Araripe e a Chapada Diamantina) obtiveram valores mais altos de GPP, Reco e NEE, e a Depressão Sertaneja Meridional obteve valores baixos entre os anos de 2015 e 2019. Esses modelos abrem um leque de oportunidades de desenvolvimento de pesquisas científicas de análise dos fluxos de Carbono para a Caatinga com uma precisão bem superior a todos os modelos até então existentes.

## 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 27/201, processo nº: IBPG-0030-9.25/18. À Embrapa Semiárido pela disponibilização dos dados de campo. Ao laboratório de sensoriamento remoto e geoprocessamento - SERGEO, e a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], p. 711–728, 2013.

BIUDES, Marcelo Sacardi *et al.* Gross primary productivity of Brazilian Savanna (Cerrado) estimated by different remote sensing-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 307, p. 108456, 2021.

BRITO MORAIS, Ygor Cristiano *et al.* Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 585–599, 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862017000400585&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000400585&tlng=pt). Acesso em: 17 jun. 2019.

DE SÁ, Cledson Sandro Barros *et al.* Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submedeo San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. **Pedobiologia**, [s. l.], v. 85–86, p. 150729, 2021.

FERREIRA, Rosaria R. *et al.* An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the Caatinga biome, Brazil. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1826063>, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 1275–1291, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2020.1826063>. Acesso em: 21 set. 2021.

FLORES-RENTERÍA, Dulce *et al.* Seasonal controlling factors of CO<sub>2</sub> exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan

Desert, Mexico. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 858, p. 159918, 2023.

GUAN, Xiaobin *et al.* Comparison of big-leaf and two-leaf light use efficiency models for GPP simulation after considering a radiation scalar. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 313, p. 108761, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192321004470>. Acesso em: 1 fev. 2022.

JIA, Xin *et al.* Seasonal and interannual variations in ecosystem respiration in relation to temperature, moisture, and productivity in a temperate semi-arid shrubland. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 709, p. 136210, 2020.  
KILL, Lúcia Helena Piedade. Caracterização da vegetação da reserva legal da Embrapa Semiárido. **Documentos** 281, [s. l.], p. 25, 2017.

LACERDA, Aldenice Correia *et al.* Edapho-topo-climatic influence on gross primary production in semi-arid. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 3119–3135, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/view/249091>. Acesso em: 23 abr. 2021.

LEAL DE OLIVEIRA, Maria Betânia; BARBOSA SANTOS, José; MANZI, Ocimar. **TROCAS DE ENERGIA E FLUXO DE CARBONO ENTRE A VEGETAÇÃO DE CAATINGA E ATMOSFERA NO NORDESTE BRASILEIRO**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159429/1/OPB1338.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2019.

LIMA, Rafael Dantas. Birds of the Caatinga revisited: The problem of enclaves within, but not of, the Caatinga. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 191, p. 104537, 2021.

LIU, Xinjie *et al.* Modelling the influence of incident radiation on the SIF-based GPP estimation for maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 307, p. 108522, 2021.

LIU, J.F.; CHEN, S.P.; HAN, X.G. Modeling gross primary production of two steppes in Northern China using MODIS time series and climate data. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 13, p. 742–754, 2012.

MARIA, José; LEAL, Inara R. **Caatinga**. [S. l.: s. n.], [s. d.].

MENDES, Keila R. *et al.* Seasonal variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports** 2020 10:1, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-66415-w>. Acesso em: 21 set. 2021.

MIRANDA, Rodrigo de Queiroga *et al.* Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 85, p. 101992, 2020.

MOURA, MAGNA SOELMA BESERRA; GALVÍNCIO, JOSICLÉDA DOMICIANO; SILVA, BERNADO BARBOSA DA; MACHADO, CELIA CRISTINA CLEMENTE; SILVA, HEWERTON ALVES DA; OLIVEIRA, Tiago Henrique de. Gross primary production using related vegetation indices. [s. l.], v. 7004, n. 11, 2012.

MOURA, M. S. B. de *et al.* **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. Petrolina: [s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159649/1/OPB1515.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2019.

NOGUEIRA, Carla *et al.* A prolonged dry season and nitrogen deposition interactively affect CO<sub>2</sub> fluxes in an annual Mediterranean grassland. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 654, p. 978–986, 2019.

PEREIRA, Marcos Paulo Santos *et al.* Brazilian Dry Forest (Caatinga) Response To Multiple ENSO: the role of Atlantic and Pacific Ocean. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 705, p. 135717, 2020.

PÔRTO, Kátia C; CABRAL, Jaime J P; TABARELLI BIODIVERSIDADE, Marcelo. Brejos de Altitude em Pernambuco e Paraíba. [s. l.],

RODDA, Suraj Reddy *et al.* Multi-year eddy covariance measurements of net ecosystem exchange in tropical dry deciduous forest of India. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 301–302, p. 108351, 2021.

SILVA, Joélia Natalia Bezerra *et al.* Análise da distribuição espacial dos fluxos de carbono no ecossistema da caatinga. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, [s. l.], v. 123, p. 115–123, 2024.

SILVA, Joélia Natalia Bezerra *et al.* 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**, [s. l.], v. 093, p. 75–93, 2024.

SILVA, Joelia Natália Bezerra da *et al.* Índice de vegetação como subsídio na identificação de áreas com potenciais a desertificação. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 358–367, 2017. Disponível em: <http://www.ead.codai.ufpe.br/index.php/JEAP/article/view/1469/1443>. Acesso em: 28 jan. 2022.

SILVA, Joélia Natália Bezerra da *et al.* Modelos da Produtividade Primária Bruta em área de floresta tropical em sazonalmente seca, usando dados reflectância da vegetação de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 3775–3784, 2021. Disponível em: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:rPzBsxN\\_YeUJ:https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/download/232661/26674+&cd=3&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:rPzBsxN_YeUJ:https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/download/232661/26674+&cd=3&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br). Acesso em: 3 ago. 2021.

SILVA, Joelia Natália Bezerra da. Análise espaço-temporal dos fluxos de carbono no domínio da floresta tropical sazonalmente seca, caatinga. 2022. **Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)** - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SILVA, Paulo Ferreira da *et al.* Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 147, p. 71–82, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196317301672>. Acesso em: 23 maio 2019.

TABARELLI, Marcelo *et al.* Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, [s. l.], v. 70, n. 4, p. 25–29, 2018. Disponível em: [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252018000400009&lng=pt&tlng=pt](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252018000400009&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 17 jun. 2019.

VELLOSO, Agnes L; SAMPAIO, Everardo V. S. B.; PAREYN, Frans G. C. Ecorregiões Propostas para o Bioma Caatinga. **Associação Plantas do Nordeste; Instituto de conservação Ambiental The Nature Conservancy do Brasil**, [s. l.], p. 76, 2002.

VIEIRA, Ligia A.F. *et al.* Divergent herb communities in drier and chronically disturbed areas of the Brazilian Caatinga. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2530064421000997>. Acesso em: 1 fev. 2022.