Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

SAZONALIDADE DO SEQUESTRO E ESTOQUE DE CARBONO NA CAATINGA, DURANTE AS ESTAÇÕES SECA E CHUVOSA

Seasonality of carbon sequestration and storage in the caatinga, during the dry and rainy seasons

Estacionalidad de la captación y del stock de carbono en la Caatinga, durante las estaciones seca y lluviosa

Luciana Cristina de Sousa Vieira
Bolsista de Programa de Capacitação Institucional do CNPq- Nível DA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
luciana.vieira@inpe.br

Vicente De Paula Silva Filho
Pesquisador Sênior, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
vicente.silva@inpe.br

Vanessa De Almeida Dantas
Bolsista, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
vanessalmeida24@gmail.com

Prakki Satyamurty
Professor visitante Nacional Senior, PPG CLIAMB, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA
saty.prakki@gmail.com

Aldeize Da Silva Santos
Bolsista, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA
aldeizesantos@yahoo.com.br

Resumo: A produção de biomassa em áreas de Caatinga apresenta grande variação espacial e sazonal, principalmente em função da distribuição das chuvas. Diante da diminuição da vegetação de Caatinga no nordeste brasileiro e ao consequente avanço da desertificação em todo o bioma, o presente estudo analisou qual tem sido o sequestro de carbono para o período de 2001 a 2019, em quatro áreas localizadas ao norte (A1), leste (A2), sul (A3) e oeste (A4) do bioma, e o que pode estar conduzindo com maior influência seu aumento ou diminuição. Através da análise com dados de sensoriamento remoto de produtividade primária bruta (PPB) e líquida (PPL), provenientes do MODIS, e dados de clima obtidos do NCEP e estações meteorológicas, observou-se que estão havendo uma redução das

chuvas em todas as áreas, um aumento da temperatura do ar e redução de absorção de carbono pela biomassa. O teste de Mann-Kendall foi aplicado para verificar o nível de significância destas mudanças e constatamos que os resultados foram estatisticamente significativos somente para A2. Também se verificou que a variável determinante no crescimento da vegetação de Caatinga é a chuva. Mesmo com baixa significância estatística para a maior parte das áreas, foi verificado que a PPB e PPL estão reduzindo para A1, A2 e A4 como possível consequência desta mudança no clima. Em A3 onde se observou aumento no sequestro de carbono, provavelmente devido a hidrologia local, o que está fazendo com que esta área de Caatinga seja resiliente mesmo em períodos de seca.
Palavras-chave: Caatinga, carbono, vegetação, chuva

Abstract: Biomass production in Caatinga areas presents great spatial and seasonal variation, mainly due to the distribution of rainfall. In the view of the decrease in Caatinga vegetation in northeastern Brazil and consequent advance of desertification throughout the biome, the present study analyzed how carbon sequestration has been for the period from 2001 to 2019, in four areas located in the north (A1), east (A2), south (A3) and west (A4) of the biome, and what may be driving its increase or decrease with greater influence. Through the analysis with remote sensing data of gross primary productivity (PPB) and net primary productivity (PPL) from MODIS, and climatic data obtained from NCEP and meteorological stations, it was observed that there is a reduction in rainfall and an increase in air temperature in all four areas. The Man-Kendal test was applied to verify the level of significance of these alterations and we found that the results were statistically significant only for A2. It was also verified that the determining variable in the growth of the vegetation of the Caatinga is the rain. Even with low statistical significance for most areas, it was found that PPB and PPL are reducing at A1, A2 and A4 as a possible consequence of climate change. In A3 an increase in carbon sequestration was observed, probably due to the local hydrology that is making this area resilient even in periods of drought.
Keywords: Caatinga, carbon, vegetation, rain

Resumen: La producción de biomasa en las áreas de Caatinga presenta una gran variación espacial y estacional, principalmente debido a la distribución de las lluvias. En vista de la disminución de la vegetación de Caatinga en el noreste de Brasil y el consecuente avance de la desertificación en todo el bioma, el presente estudio analizó cuál ha sido el secuestro de carbono para el período de 2001 a 2019, en cuatro áreas ubicadas al norte (A1), este (A2), sur (A3) y oeste (A4) del bioma, y lo que puede estar impulsando su aumento o disminución con mayor influencia. Mediante el análisis con datos de teledetección de productividad primaria bruta (PPB) y productividad primaria neta (PPN), del MODIS, y datos climáticos obtenidos del NCEP y estaciones meteorológicas, se observó que existe una reducción de las precipitaciones en todas las zonas y un aumento de las precipitaciones. Temperatura del aire. Se aplicó la prueba de Man-Kendal para verificar el nivel de significación de estas alteraciones y encontramos que los resultados fueron estadísticamente significativos solo para A2. También se verificó que la variable determinante en el crecimiento de la vegetación de la Caatinga es la lluvia. Incluso con baja significancia estadística para la mayoría de las áreas, se encontró que PPB y PPL se están reduciendo a A1, A2 y A4 como una posible consecuencia de este cambio en el clima, con la excepción de A3 donde se observó un aumento en la captura de carbono, probablemente debido a la hidrología local que está haciendo que esta área de Caatinga sea resiliente, incluso en períodos de sequía.
Palabras clave: Caatinga, carbono, vegetación, lluvia.

Submetido em: 28/01/2022
Aceito para publicação em: 20/10/2022
Publicado em:25/10/2022

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui 180.000 km^2 de área em processo grave de desertificação, concentrada principalmente no Nordeste, no chamado Semiárido Brasileiro (SAB), com mais da metade (55,25%) do seu território atingido em diferentes graus de degradação (BRASIL, 2004). Uma nova delimitação do SAB definiu uma área correspondente a 1.128.697 km^2, chegando a 1.262 municípios. Três critérios foram considerados para a escolha desta nova delimitação: precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros, índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona a precipitação e a evapotranspiração potencial e o risco de seca maior que 60% (SILVA *et al*. 2020).

Situado no SAB, o bioma Caatinga abriga diversas formações vegetais e ocupa a maior parte da região do semiárido brasileiro (ROCHA *et al*. 2009). Segundo Sá (2010) o bioma ocupa uma área de 844.453 km^2 de extensão, cobrindo aproximadamente 9,9% do território nacional. Mesmo tendo uma grande relevância biológica, a Caatinga é um dos biomas mais ameaçados e pouco preservado do Brasil. A mudança na cobertura do solo, devido à ocupação humana para diversas atividades, faz com que seja difícil encontrar remanescentes da vegetação nativa maiores que 10 mil hectares (LEAL *et al*. 2005).

A quantidade de biomassa de uma floresta nativa pode variar muito, não só de acordo com o tipo de floresta, mas também pelas condições edafoclimáticas. De acordo com LIMA JÚNIOR *et al*. (2014), existe uma grande variação espacial de biomassa em áreas de Caatinga, comportamento atribuído em grande parte a baixa precipitação e distribuição irregular das chuvas.

Se por um lado o aumento no valor da temperatura do ar global segue o aumento da concentração do dióxido carbônico (CO_2) atmosférico, por outro, a absorção de carbono pela vegetação aumenta conforme aumenta a concentração de CO_2 atmosférico (ZHANG *et al*. 2014). Alguns experimentos controlados constataram que, em média, ao se passar do valor da concentração de CO_2 atmosférico de 300 ppm para o valor de 600 ppm obtém-se um aumento de 3O% na produtividade vegetal (IDSO *et al*. 1989). O processo de crescimento na produtividade vegetal devido a altas concentrações de CO_2 ficou conhecido como efeito de fertilização por CO_2 (PACHECO, 1990).

Experimentos com fertilização de CO_2 em áreas florestadas mostraram que as respostas do crescimento ou não da vegetação, a nível de folha, depende da sensibilidade dos estômatos ao CO_2 e da atividade das enzimas. Isto porque a sensibilidade dos estômatos à concentração de CO_2 no ambiente externo da folha pode ser diferenciada (PACHECO, 1990).

Evidências experimentais obtidas em estudos de campo sobre os impactos diretos do aumento de CO_2 têm mostrado que as respostas em nível de folha em relação à taxa de assimilação de CO_2 estão atreladas a dois pontos: sensibilidade dos estômatos ao CO_2 e atividade das enzimas fotossintéticas (PACHECO *et al*. 1990).

Outros experimentos de campo mostraram que sob altas concentrações de CO_2, houve uma redução na abertura dos estômatos levando a menor perda de água pela planta, consequentemente, esta redução na transpiração aumentou a eficiência no uso da água levando a um provável aumento na produtividade vegetal SHUGART *et al*. (1986).

Em contrapartida, a redução na abertura dos estômatos e da transpiração pode levar a um efeito negativo na chuva em locais onde grande parte da precipitação depende da evaporação da superfície do solo causando secas nas regiões. Assim, as reduções da umidade do solo, do escoamento superficial e subsuperficial e, consequentemente, das vazões dos rios que causam a chamada seca hidrológica, podem ser inevitáveis (BETTS *et al*. 2004; LIBERATO *et al*. 2010).

No Canadá, em uma área de floresta boreal, onde a vegetação é composta de espécies de pinus, sendo florestas mais homogêneas e com árvores mais esparsas, sendo possível visualizar o solo com facilidade, foi realizado um experimento através de fertilização de CO_2, e os resultados mostraram que pode haver um aumento de 14% no crescimento da floresta, com o dobro da concentração de CO_2 (GIRARDIN *et al*. 2011). Porém, este incremento de CO_2 na biomassa da planta pode ter limitações. Para as plantas do tipo C3, que são plantas sem adaptações fotossintéticas para reduzir a fotorrespiração (BUCKERIDG *et al*.2016), por exemplo, podem ter uma taxa fotossintética máxima sob intensa luminosidade e temperatura moderada, mas podem ser inibidas no seu crescimento a altas temperaturas. Já as plantas C4, que são plantas que possuem adaptação para reduzir os efeitos prejudiciais do declínio gradual de CO_2 atmosférico (BUCKERIDGE *et al*. 2016), são mais adaptadas à intensa luminosidade e a altas temperaturas que, nestas condições, poderiam ser mais eficientes (PACHECO, 1990).

Dentre as variáveis físicas climáticas que estão mais relacionadas com o balanço de carbono da vegetação, destacam-se não somente a temperatura do ar, mas também a chuva, radiação solar incidente à superfície, umidade do ar e a velocidade do vento (MOURA *et al*. 2015). Mesmo sabendo do papel de cada uma destas variáveis do clima sobre os fluxos de CO_2 para a vegetação, o conhecimento sobre a interação entre o sistema vegetativo e o ambiente que o circunda ainda necessita de mais investigação.

Assim, este estudo teve como objetivo investigar o fluxo de carbono sobre o bioma Caatinga, considerando dados de produtividade da vegetação e a sua correlação com dados de clima, visando a verificação da absorção de carbono da atmosfera por parte do bioma.

2. METODOLOGIA

2.1. Localização e caracterização das áreas de estudo

Quatro áreas de unidades de conservação (UC), localizadas em posições extremas do bioma, foram estudadas para relacionar o crescimento ou redução da vegetação a diferentes condições de chuva e temperatura do ar, considerando que a chuva no bioma apresenta variabilidades espaciais e sazonais. Estas áreas, mostradas na Figura 1, são: ao norte do bioma a UC de Furna Feia (A1), à leste a UC Raso da Catarina (A2), ao sul a UC Serra do Barbado (A3), e à oeste a UC Dunas e veredas do baixo médio São Francisco (A4).

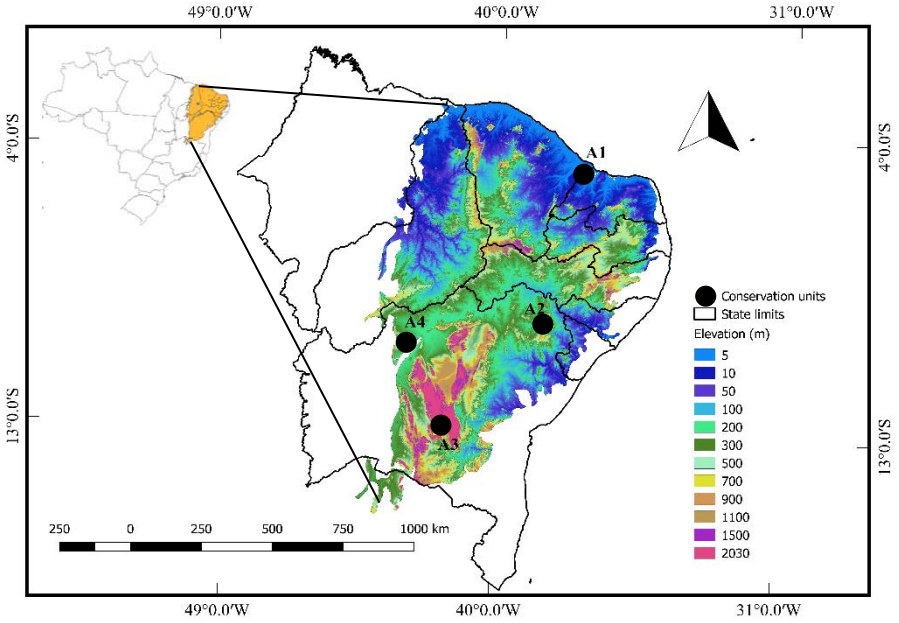
A área A1 possui 8.494 hectares (ha) e está inserida nos municípios de Mossoró e Baraúna no RN. Furna Feia foi escolhida por estar entre os oito parques nacionais do Bioma Caatinga preservada, sendo grande parte composta por savana estépica (FREIRE, 2021).

A área A2 possui 104.842 ha e encontra-se no estado da Bahia entre os municípios de Paulo Afonso, Rodelas e Jeremoabo. Esta estação ecológica recebe o nome de "Raso da Catarina" devido aos solos rasos que lá estão presentes (DE SILVA, 2015). Na área A2 grande parte da vegetação é de Caatinga arbustiva densa, seguida por caatinga herbácea e algumas áreas degradadas que estão em regeneração (CARDOSO *et al*. 2006). A fitofisionomia para A2 indica que a área possui savana estépica e ecótono. Além disto, apresenta áreas circundantes sendo utilizadas para agropecuária.

A área A3 abrange cerca de 63.652 ha e está inserida nos municípios de Abaíra, Érico Cardoso, Piatã, Serra do Barbado e Rio do Pires no estado da Bahia. A3 possui fitofisionomia

classificada como savana estépica, ecótono, savana, floresta estacional decidual, vegetação secundária, floresta estacional semi-decidual e alguns locais sendo utilizados para atividades agropecuárias

Figura 1 - Bioma Caatinga na região Nordeste do Brasil e localização das áreas de estudo.



Fonte: de Sousa V. *et al*. (2022).

A área localizada a oeste do bioma denominada de A4 é uma área de proteção ambiental conhecida como Dunas e Veredas do Baixo-médio São Francisco no estado da Bahia. Foi criada em 1997 e abrange uma área de 1.085 ha (SENA, 2021). Esta unidade está inserida nos municípios de Barra, Pilão Arcado e Xique-Xique (Tabela 1). A4 possui a mesma fitofisionomia encontrada em A3, com acréscimo de áreas de formações pioneiras e dunas.

2.2. Dados de chuva

Os dados de precipitação (PRP) foram obtidos do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction)* e de estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para o intervalo de 2001 a 2019 (média de dados mensais). Visando proporcionar maior robustez aos dados do NCEP, estes foram comparados, através do coeficiente de determinação (R^2), com os dados do INMET. A escolha da estação do INMET mais representativa para o ponto em questão foi feita através da análise das isoietas anuais,

com base no atlas pluviométrico do Brasil publicado pelo CPRM (Companhia de Pesquisa de recursos Minerais) (PINTO, 2013).

Os coeficientes de correlação entre os dados do NCEP e a estação de Apodi (melhor representante para A1) foi de R^2=0,7. Para A2 usou-se os dados da estação de Paulo Afonso e o R^2 ficou em 0,6. Para A3 considerou-se Itauçu, resultando em R^2=0,8. Finalmente, para A4 foi utilizada a estação da Barra, com resultado de R^2=0,78.

Uma das características mais significativas destas regiões semiáridas, é a existência de dois períodos distintos, um chuvoso e outro seco. Por isso, a análise é feita para as duas estações do ano.

2.3. Testes estatísticos para análise de tendência nas séries temporais

Os dados foram analisados estatisticamente através de regressão linear e análise de tendência, utilizando o teste de Mann-Kendall (MK), que é um teste não paramétrico usado para detectar a existência de tendências em dados de séries temporais (MANN, 1945; KENDALL, 1975; ALENCAR et al., 2012; SILVA *et al*. 2016).

Além do teste de Mann-Kendall, foi realizada a análise de regressão linear que é baseada na metodologia dos mínimos quadrados, para o ajuste de uma reta, o qual minimiza a soma dos quadrados das distâncias de y_i à reta ajustada. A equação dessa reta é dada por:

$$Y = ax + b \quad [1]$$

onde a é conhecida como o intercepto e b é a taxa de variação. Procura-se uma reta que forneça as menores diferenças entre os verdadeiros pesos e aqueles dados pela reta para as alturas correspondentes. Uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste do modelo, é através do coeficiente de correlação, que é calculado através da técnica de regressão linear, podendo variar de -1 a 1 e mensura o nível de relação entre as variáveis. Quanto mais próximo da unidade (positiva ou negativa), mais intensa será a correlação (SANTOS, 2015).

Os valores de Tau de Kendall indicam o sentido da tendência do parâmetro ao longo do tempo, podendo ser de elevação (valores positivos) ou tendência de redução (valores negativos). Os resultados para valor-p maiores que 0,05 indicam que não há significância estatística (SG).

O teste estatístico não-paramétrico de Pettitt (PETTITT, 1979), é um teste utilizado para identificação de tendências climáticas. O teste indica o ponto de mudança brusca do valor máximo de K(t), quando este for maior que o limite crítico estabelecido, ou seja, K é o valor que indica a possibilidade de localizar o ponto em que ocorreu a ruptura na série (o ponto de mudança de tendência na série). As fórmulas de Pettitt podem ser encontradas nos trabalhos de (PETTITT, 1979; MORAES *et al*. 1995; BACK, 2001).

Foram realizadas também análises através de climograma para cada local. O climograma foi desenvolvido por WALTER e LIETH (1967) e retrata a temperatura do ar e a precipitação mensal (PRP) média ao longo de um ano. As escalas de Walter equalizam 20 mm de precipitação mensal com 10 °C de temperatura do ar (T_{ar}). Esta forma de representação faz com que seja visível graficamente a distribuição sazonal do período seco e úmido e então seja caracterizado o bioma da região de acordo com este ciclo anual. Em qualquer mês em que a linha de PRP esteja abaixo da linha de T_{ar}, o crescimento das plantas é restringido pela ausência das chuvas que supram a necessidade do bioma local.

O climograma costuma ter a seguinte estrutura: um eixo de abcissas, abaixo, onde se encontram os meses do ano, um eixo de ordenadas à direita, onde está colocada a escala de temperatura, e um eixo de ordenadas à esquerda com a precipitação escala, e que é o dobro da escala de temperatura. Desta forma é possível ver diretamente se há aridez quando a curva de precipitação está abaixo da curva de temperatura. Para que o climograma seja mais significativo, ele deve ser acompanhado de alguns dados, como a localização da estação meteorológica, a precipitação média total e a temperatura média anual (WALTER e LIETH (1967).

2.4. Dados de vegetação.

Foram utilizados produtos do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado abordo do satélite TERRA, com resolução espacial de 500 m (Tabela 2). Os dados foram de produtividade primária bruta (PPB) com médias mensais para o período de 2001 a 2019 e média anual para PPL (2001-2019). Os produtos MODIS de ecossistemas terrestres estão disponíveis na projeção sinusoidal (SIN) e são divididos em quadrantes (Tiles) de 10 x 10 graus (DAAC, 2018).

Tabela 2- Descrição dos dados do MODIS para PPB e PPL

Dado	ID (satélite)	Frequencia	Resolução
PPB	MOD18A2	8-Dia	500 m
PPL	MOD18A3H	Ano	500 m

Fonte: ORNL DAAC, 2018

As equações para o sensor do satélite são:

$$\text{PPB} = \varepsilon + APAR \quad [2]$$

onde PPB (kg m^{-2}) é o total diário de fotossíntese mensurando a quantidade de carbono fixado no processo fotossintético (LIU, 1945), ε é a eficiência de uso de radiação. A APAR é calculada pelo sensor a partir da equação 3:

$$APAR = \text{ƒ} + PAR \quad [3]$$

Em que: f é a fração da radiação fotossinteticamente ativa, interceptada pela área foliar (Bastiaanssen *e* Ali 2003).

O cálculo da PPL é feito com base no valor de PPB, Rm (respiração de manutenção) e RC (respiração de crescimento).

$$PPL = PPB - Rm - Rc \quad [4]$$

A observação das tendências nas séries temporais, foi feita com o ajuste de regressões lineares simples. Assim, as inclinações das retas foram identificadas e suas tendências, juntamente com as séries, são plotadas. Os dados foram analisados utilizando o software Rstudio, versão 4.0.

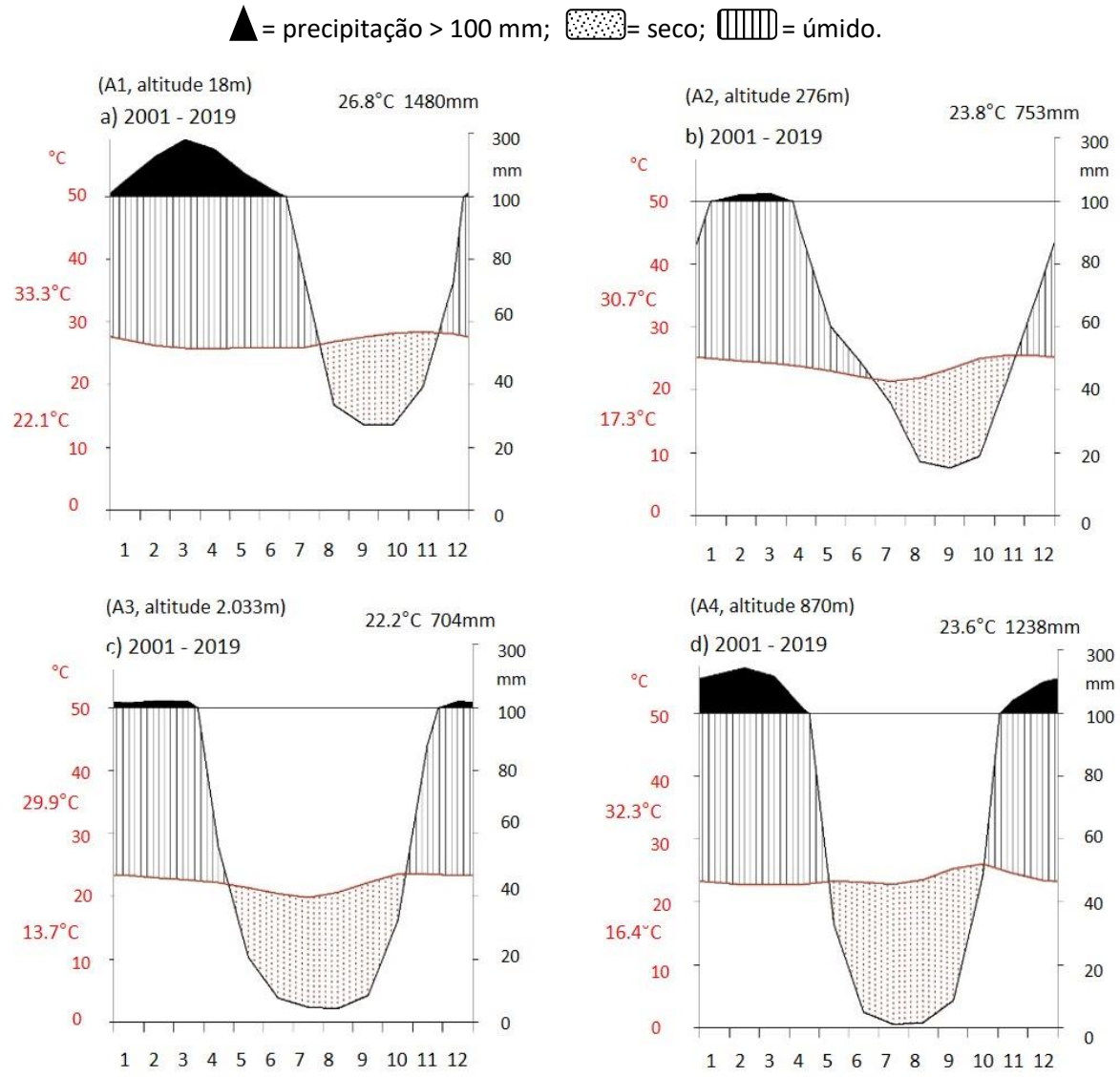
3. Resultados e discussão.

3.3. Dados de chuva, temperatura do ar e fotossíntese.

De acordo com os climogramas mostrados na Figura 2 (a, b, c e d), a linha de precipitação abaixo da linha de temperatura, durante o período seco, em todos os casos, indica um período de crescimento limitado das plantas pela precipitação. As temperaturas médias anuais se mostraram bastante elevadas apresentando valores entre 22°C e 26.8°C. As

áreas A1 e A4 apresentam maiores valores médios de chuva acumulado anualmente, 1480 mm ano^{-1} e 1238 mm ano^{-1}, respectivamente, e média da temperatura do ar de 26,8°C para A1 e 23,6°C para A4.

Figura 2 Diagramas climáticos para todas as quatro áreas para a série de dados de 2001 a 2019 (médias mensais), segundo a metodologia de Gaussen (1945), proposta por Walter e Lieth (1967). Linha vermelha para temperatura do ar e linha preta para precipitação (PRP). Valores máximos e mínimos de T_{ar} plotados a direita do gráfico, média anual de T_{ar} e PRP plotados acima do gráfico.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) possui forte influência no regime de chuvas sobre a área A1, sendo o sistema mais importantes na abundância das chuvas na parte

norte do nordeste brasileiro (FERREIRA *et al*. 2005). Sobre a área A4, os sistemas atmosféricos que mais contribuem para as chuvas são os Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), a atuação de sistemas frontais provenientes do sul do país durante os meses de janeiro a março e de forma indireta a ZCIT (SANTOS, 2015).

Em A2 e A3 verificaram-se menores valores de acumulado anual de chuva, 753 mm ano^{-1} e 704 mm ano^{-1} respectivamente, com média da temperatura do ar de 23,8°C para A2 e 22,2°C para A3. A ação dos ventos alísios, para A2 e A3, carregando umidade para continente é uma importante contribuição para as chuvas, e a distribuição da precipitação nessas regiões é mais irregular (PAES, 2008).

Em A2 e A3 verificaram-se menores valores de acumulado anual de PRP, 753 mm ano^{-1} e 704 mm ano^{-1}, respectivamente, com média da temperatura do ar de 23,8°C para A2 e 22,2°C para A3. A ação dos ventos alísios, para A2 e A3, carregando umidade para continente, é a principal contribuição para as chuvas, e a distribuição das precipitações nessas regiões é mais irregular (PAES, 2008).

Foi verificado que o período chuvoso dura cerca de 4 meses para as áreas A1 e A2 (janeiro a abril) e cerca de 5 meses para A3 e A4 (novembro a março), o período seco dura cerca de 7 meses para A1 e A2 (junho a novembro) e 7 meses para A3 e A4 (abril a outubro), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3- Período seco e chuvoso de cada local e a precipitação total anual média (2001-2019).

Área de estudo	Período chuvoso	Período seco	Total anual (mm)
A1	Jan-Abril	Jun-Nov	857
A2	Jan-Abril	Jun-Nov	583
A3	Nov-Março	Abril -Outubro	722
A4	Nov-Março	Abril - Outubro	839

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O teste de MannKendall (Tabela 4), mostra que houve redução das chuvas tanto para o período seco quanto para o chuvoso em todos os locais, porém foi estatisticamente significativo somente para A2 com valor-p = 0,032 no período chuvoso e valor-p =0,050 no período seco.

O teste de Pettitt para A2 indica que no ano de 2011 houve uma mudança brusca com a tendência decrescente da precipitação para o período chuvoso (Tabela 4). O ano de 2011 para a região de A2 apresentou o menor valor total anual de chuva (796 mm). VIEIRA *et al*. (2014) analisou a tendência das chuvas de 1910 a 2012 para Paulo Afonso (estação usada para A2), e o teste estatístico de MK para este local revelou tendência decrescente (τ = -1,240) das chuvas.

De acordo com MARENGO *et al*. (2011), os meses mais chuvosos na parte norte do NE são fevereiro a maio como consequência do posicionamento da ZCIT (Zona de Convergência intertropical). Em A1, entretanto, houve redução das chuvas, o que sugere a ausência da ZCIT. De novembro a dezembro houve maior redução das chuvas no setor sul do Nordeste, mostrando redução para A4 no período chuvoso (novembro-março).

No sul do Nordeste brasileiro, mais especificamente no Estado da Bahia (BA) onde encontram-se A2, A3 e A4, atuam sistemas meteorológicos que são responsáveis pela precipitação na região, como: Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN), brisas terrestres, ondas de leste e sistemas frontais ou seus vestígios (TANAJURA et al., 2010). A atuação desses sistemas determina períodos chuvosos bem definidos nas sub-regiões do Estado da Bahia (MAGALHÃES *et al*. 1988; CHAVES, 1999; CHAVES e CAVALCANTI, 2001; MOLION e BERNARDO, 2002).

Tabela 4- Teste de Mann-Kendall aplicado às quatro regiões. Tendência observada (mm mês). S.G. (significância estatística).

Local	**Período**	**Mann-Kendall**			**Pettitt**		
		Tau	Valor P	S.G	K	Valor-p	Ano
A1	úmido	-0,046	0,541	N	48	0,657	Abril,2011
	seco	-0,095	0,156	N	80	0,249	Jul,2015
A2	úmido	-0,163	0,032	S	48	0,027	Abril,2011
	seco	-0,129	0,050	S	80	0,176	Jul,2015
A3	úmido	-0,125	0,067	N	45	0,118	Dez,2008
	seco	-0,007	0,903	N	45	0,781	Maio,2006
A4	úmido	-0,083	0,218	N	60	0,218	Dez,2011
	seco	-0,008	0,879	N	29	1,152	Abril,2004

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Com relação aos dados de temperatura do ar (Tabela 5), todas as áreas apresentaram aumento. Esse aumento foi significativo para A1 no período úmido (valor-p =0.06) e seco (valor-p=0.002). Em A2, no período úmido, também foi observado aumento significativo da T_{ar} (valor-p=0.033).

O teste de Pettitt mostrou mudanças bruscas significativas no período úmido para A1 (Valor- p = 0.007) no ano de 2011, e para A2 em 2012 com p=0.023. De acordo com a nota técnica do INMET, a média anual da temperatura do ar no Brasil em meados de 1997 ficou acima da média climatológica, e o desvio padrão de temperatura do ar para o nordeste foi 0.86 até 2015. Portanto, o aumento da temperatura do ar já vem sendo observado há alguns anos.

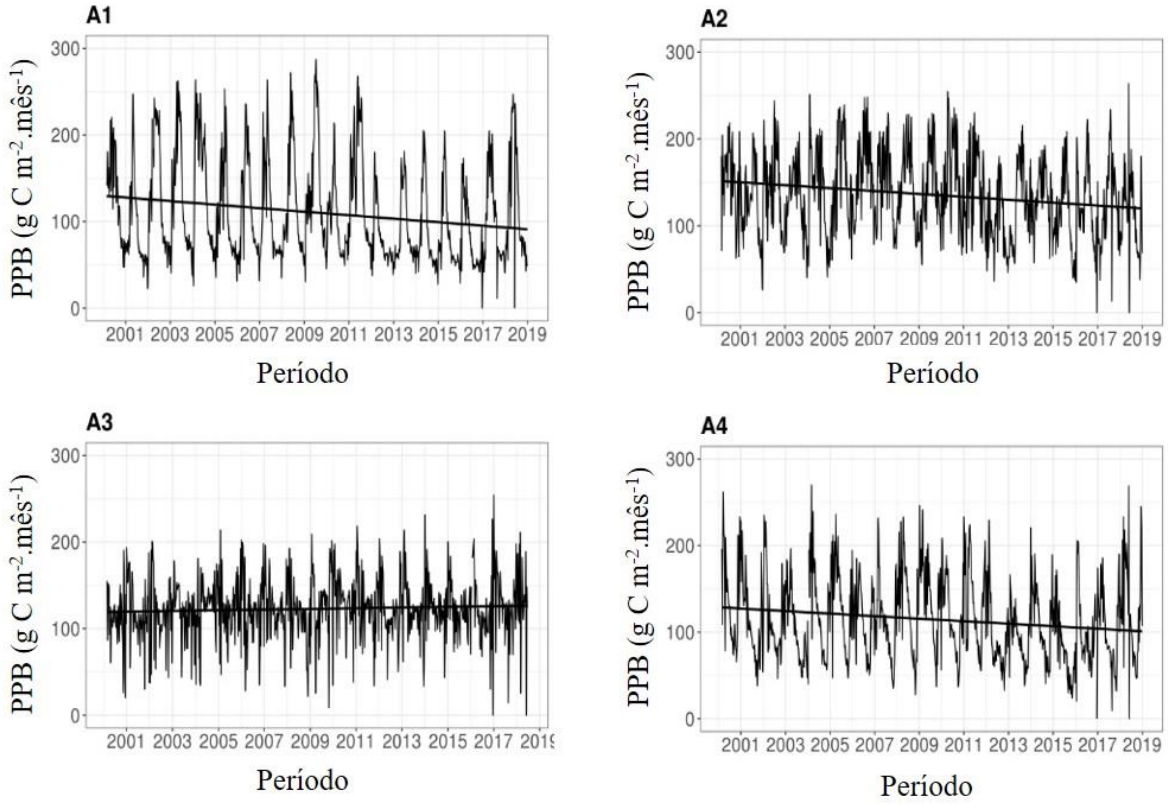
Tabela 5- Teste de Mann-Kendall aplicado às quatro regiões para temperatura do ar. Tendência observada. S.G. (significância estatística).

Local	Período	Mann-Kendall			Pettitt		
		Tau	Valor P	S.G	K	Valor P	Ano
A1	úmido	0,209	0,006	S	48	0,007	Abril,2011
	seco	0,204	0,002	S	81	0,106	Julho,2015
A2	úmido	0,162	0,033	S	52	0,023	Abril,2012
	seco	0,087	0,189	N	81	0,565	Julho,2015
A3	úmido	0,027	0,692	N	75	0,193	Dez,2014
	seco	0,057	0,311	N	96	0,494	Ago,2013
A4	úmido	0,034	0,610	N	8	0,926	Mar,2001
	seco	0, 079	0,164	N	83	0,370	Set,2011

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 3 apresenta os valores de PPB no período e as linhas de tendências lineares nas quatro áreas. Observa-se tendências de redução da PPB nas áreas A1, A2 e A4. Para A3 a linha de tendência mostra um aumento tênue da PPB ao longo da série.

Figura 3. Série temporal dos valores médios (2001-2019) da produtividade primária bruta (PPB) em g C m^{-2} $mês^{-1}$ para as quatro áreas estudadas.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Através da Tabela 6, pode-se observar os valores médios de PPB nas estações secas e chuvosas. Em média, há um acúmulo de carbono nos meses mais chuvosos e menos quentes. A caatinga alcança maior produtividade da vegetação no período chuvoso entre janeiro e maio aproximadamente, tendo o pico por meados de março com o aumento do índice de área foliar, evapotranspiração, produtividade primária bruta e, consequentemente, da produtividade primária líquida. Com a redução das chuvas observada em algumas das áreas de estudo, houve redução dos componentes que fazem parte da produtividade da vegetação.

Para as áreas A3 e A4 também se observou que os maiores valores de PPB ocorreram durante o período chuvoso com valores de 155 e 135 g C m^2 $mês^{-1}$ respectivamente. Valores de PPB, durante o período chuvoso, em torno de 120 a 140 g C m^2 $mês^{-1}$ também já foram encontrados em áreas de vegetação de caatinga mais preservada na região de Petrolina-PE por BRITO et al. (2017). Para o período seco, os autores encontraram valores variando entre 60 e 80 g C m^2 $mês^{-1}$. A análise dos dados de PPB para a área A1, durante o período chuvoso que compreende os meses de janeiro a abril, mostrou que quando a estação seca encerra e

as chuvas voltam para a região, há um aumento simultâneo da PPB. O maior acúmulo de carbono em A1 ocorre no período chuvoso, em torno de 115 g C m^2 $mês^{-1}$ (Tabela 6) e durante o período seco em torno de 101 g C m^2 $mês^{-1}$. O maior valor de PPB para A2 ocorreu durante o período seco, isso porque nos meses de novembro e dezembro (meses de transição do período seco para o chuvoso) começa a haver uma pequena disponibilidade hídrica no solo, favorável ao crescimento da vegetação, razão pela qual houvesse um pequeno aumento da PPB durante os meses de novembro e dezembro (meses considerados secos).

Tabela 6- Média mensal dos dados de produtividade primária bruta (PPB), temperatura do ar (T_{ar}) e chuva para os períodos seco e chuvoso, para o intervalo de 2001-2019.

Local	Período	PPB (g C m^2 $mês^{-1}$)	T_{ar} (°C)	Chuva (mm $mês^{-1}$)
A1	úmido	115	26.4	139
	seco	101	26.5	23
A2	úmido	122	24.5	78
	seco	147	23.0	25
A3	úmido	155	23.0	89
	seco	136	22.0	63
A4	úmido	135	24.0	123
	seco	97	23.2	74

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O resultado do teste de Mann-Kendall para a PPB (Tabela 7) mostrou redução significativa em A1 para o período seco e para A2 no período úmido e seco.

A área A3 apresentou tendência não significativa para o período úmido, valor-p=0.039 e valor-p=0.004 para o período seco. A estabilidade da absorção de carbono durante os últimos 19 anos em A3, pode ser explicado pelo fato desta área estar inserida em uma região bem drenada e com vários corpos d'água circundando a reserva. Durante os períodos de seca severa, é possível que vegetações que estejam sobre lençóis freáticos rasos consigam resistir aos efeitos da diminuição das chuvas, como foi o caso das observações feitas sobre uma área de floresta tropical em um artigo publicado por SOUSA *et al*. (2020). Devido A3 estar inserida em uma área considerada como "berço das nascentes", que funciona como um divisor de águas das bacias hidrográficas do Rio Paramirim (São Francisco) e do Rio de Contas, pode-se

dizer que é uma área onde a hidrologia local pode estar ajudando na manutenção da vegetação, mesmo que a área tenha uma tendência de redução da chuva. Este fato reforça a afirmativa de SOUSA *et al*. (2020) de que a hidrologia local tem implicações nos feedbacks das mudanças climáticas.

Em A4 observou-se uma redução da PPB, acompanhado de redução das chuvas e aumento da temperatura do ar. A redução em A4 da PPB é reforçada pelo teste de MK que mostrou valor significativo de redução durante o período seco, valor-p=0,048.

Tabela 7- Teste de Mann-Kendall aplicado às quatro regiões para produtividade primária bruta. Tendência observada durante os períodos seco e chuvoso. S.G. (significância estatística).

Local	Período	Mann-Kendall			Pettitt		
		Tau	Valor P	S.G.	K	Valor P	Ano
A1	úmido	-0,123	0,877	N	16	0,765	Abril,2004
	seco	-0,164	0,009	S	65	0,003	Out,2011
A2	úmido	-0,214	0,006	S	44	0,0003	Abril,2011
	seco	-0,135	0,033	S	63	0,003	Julho,2011
A3	úmido	0,039	0,962	N	40	0,962	Dez,2008
	seco	0,004	0,947	N	76	0,263	Set,2011
A4	úmido	-0,067	0,334	N	57	0,470	Fev,2012
	seco	-0,115	0,048	S	75	0,019	Julho,2011

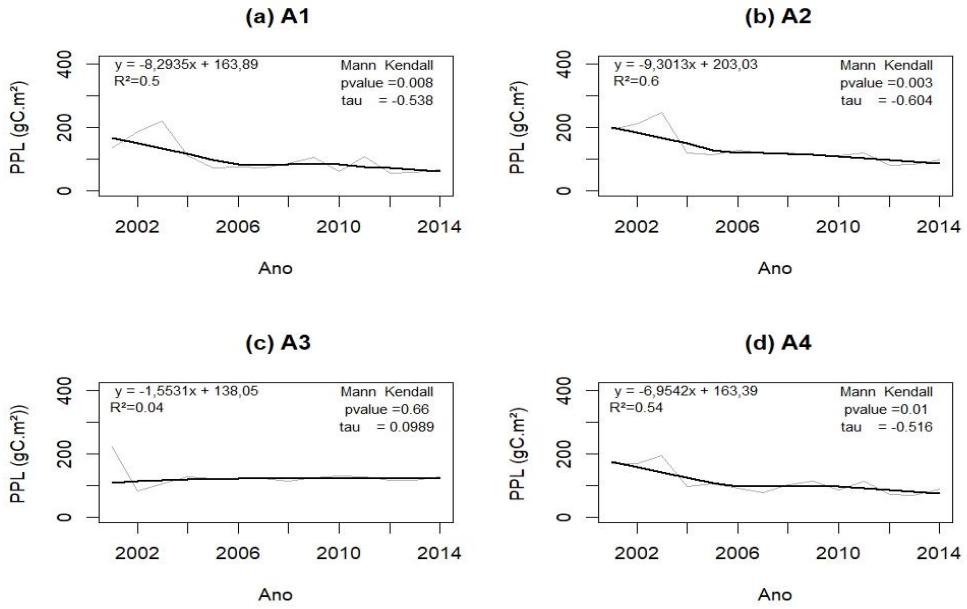
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

É possível que esta diminuição na PPB seja devido aos períodos secos que foram encontrados na região NE, que variaram de acordo com a área. Para o nordeste do Brasil, uma pesquisa realizada por MONCUNILL (2006) identificou tendência de redução das chuvas anuais para o estado do Ceará entre 1974 e 2003. Esta diminuição foi identificada em 17 das 32 estações analisadas. Localidades como os estados da Paraíba, Sertão de Pernambuco, Rio grande do Norte, também sofreram reduções de chuva (SANTOS & BRITO, 2007; LACERDA *et al*. 2009). O algoritmo que calcula a PPB no sensor MODIS tem grande dependência da quantidade de chuva na região, algoritmo construído com base em medidas de campo, de maneira que quando há redução das chuvas, a vegetação reduz a transpiração e fotossíntese para algumas espécies (MARIANO *et al.* 2009). Em todas as áreas, a quantificação do sequestro de carbono foi verificada através da NPP. A Figura 5 apresenta os dados anuais de PPL (g C m^2 $mês^{-1}$) de 2001 a 2014 (intervalo de dados disponível pelo MODIS), e os valores da regressão

e do teste de MK. O gráfico das séries temporais de PPL revela que houve tendência de redução em todas as áreas, exceto para A3 que está com valores estabilizados de PPL, seguindo o mesmo comportamento dos dados de PPB.

O teste de Mann-Kendall para A1 revelou um valor –p =0.08 e coeficiente angular (C.A.) da regressão linear de -8,29 e R^2=0,5. O teste de Pettitt para A1 mostrou que a mudanças bruscas ocorreu em 2004 e 2011 com significância estatística. Esta redução na PPL em A1 pode ser devido a situação climática local que apresentou um cenário de diminuição da chuva e aumento da temperatura do ar.

Figura 5. Valores médios anuais de PPL para as quatro áreas de Caatinga.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Em A1, entre os anos de 2001 e 2003, houve um aumento da precipitação mensal o que pôde explicar o crescente aumento da PPL para o mesmo intervalo. Nos últimos anos, de 2012 a 2014, observa-se um crescimento da PPL constante, acompanhando o aumento das chuvas para os mesmos anos, apesar de ainda assim, estes valores de chuva estarem abaixo em relação aos anos anteriores. Este resultado pode indicar que em uma área preservada, mesmo com a redução da chuva e aumento da temperatura do ar, quando há o aumento da chuva local, haverá a manutenção e crescimento da vegetação. Porém, se para este mesmo local a vegetação tivesse sido removida por ação antrópica e o solo estivesse degradado,

mesmo com o retorno das chuvas, a vegetação teria pouca ou nenhuma chance de se desenvolver, podendo levar o local ao processo de desertificação. O principal fator para o processo da desertificação é a degradação do solo que causa extinção da biodiversidade e redução dos recursos hídricos (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2007; CONTI, 2008).

A ausência da cobertura do solo pela vegetação poderá levar a erosão que diminui a capacidade de retenção de água no solo, reduzindo a biomassa e, consequentemente, reduzindo a matéria orgânica no solo (ANTÂO, 2012). A falta de cobertura além de dificultar a retenção de água no solo, aumenta a radiação solar incidente sobre o solo, o ressecamento consequente acelera a erosão e contribui para a aridez do solo (FERNANDES, 2009). Estes eventos mostram a importância em manter unidades de conservação e abranger mais as áreas de preservação.

Em A2, os três primeiros anos registrados de PPL (Figura 5b) mostraram um máximo de absorção de carbono, de 250 g C m^2 $mês^{-1}$. No ano de 2004, este valor decresceu e manteve-se quase constante até meados de 2010. Nos anos posteriores houve redução da PPL, com valores máximos de cerca de 100 g C m^2 $mês^{-1}$. Do ano de 2010 a 2014, a região A2 sofreu um período de seca, com significativa redução das chuvas no período chuvoso, o que pode ter sido a causa da redução da PPL neste mesmo período. O teste de MK apresentou um valor-p=0.03. O C.A. para a regressão linear foi de -9.30 com R^2=0.6. O teste de Pettitt para A2 apresentou um valor significativo de mudança brusca a partir de 2011, mesmo ano em que ocorreu mudança brusca para A2 no período úmido.

A área A3 é uma região bem drenada e foi o local com menor valor de aumento da temperatura do ar, o que pode ser favorável para manter a dinâmica da vegetação e constância nos valores de sequestro de carbono. A regressão linear revelou um C.A. de -1,55 para um R^2=0,04.

A4 tem valores de PPL elevados de 2001 a 2003, com máximo de 198 g C m^2 $mês^{-1}$. Dos anos de 2004 a 2014, os dados do MODIS mostraram uma oscilação que acompanhou o comportamento da chuva. Em 2004 o acumulado de chuva de A4 foi de 939 mm ano^{-1}. Em 2005 foi de 1001 mm ano^{-1} e em 2006 de 927 mm. Esta oscilação, embora pequena, pode ter contribuído para o comportamento da PPL de 2004 a 2006. Os anos de 2012, 2013 e 2014 tiveram menor acumulado de chuva, o que refletiu na NPP que também foi menor neste

intervalo de tempo. Os testes de MK para A4 revelaram um valor- p=0,01. Na regressão linear os resultados foram C.A.=-6,95 e R^2=0,54.

Durante uma visita técnica realizada no ano de 2019 à unidade de conservação de Furna Feia (A1), constatou-se que, da área total de 8.756 ha, metade possui 100% da vegetação nativa preservada, com composição em grande parte arbórea. Esta metade apresenta-se preservada com vegetação mais densa, pelo fato de seu solo conter áreas com bastante calcário, sem valor para a agricultura ou para a agropecuária.

Por ser uma área de floresta conservada, supõe-se que a tendência de diminuição da PPB para A1 é a razão pela qual a PPL tem diminuído para os últimos 19 anos, já que a respiração de manutenção se mantém constante. Soma-se a este resultado o fato de que a chuva incidente nesta região nos últimos 19 anos diminuiu e houve aumento da temperatura do ar.

Na região A2 há a predominância de caatinga arbustiva densa (AMORIM *et al.*2016) e zonas de transição (ecótono caatinga/cerrado/floresta estacional e ecótono caatinga/cerrado) (PAES, 2008). Segundo OLIVEIRA *et al*. (2010), a vegetação de Caatinga Arbustiva original em A2 foi substituída há alguns anos com o uso destinado à agricultura irrigada nas margens do rio ou através de canais, ou a presença de Caatinga Arbustiva antropizada. Há também, além dessas características, um estabelecimento de vegetação higrófilas em seu leito menor, denotando alto grau de antropização.

A degradação em A2 devido a causas antrópicas, com substituição da cobertura vegetal, e maior predominância arbustiva atualmente, pode ser também um fator para a diminuição da PPB e NPP observada para os últimos 19 anos na região.

A composição vegetativa da área A3 é um grande mosaico de contato Caatinga – Cerrado, Floresta estacional semidecidual encontram-se em Campo Rupestre, Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado, Caatinga, Mata seca de Caatinga /Cerrado, Carrasco, fragmentos de Mata Ombrófila Densa e Capão. Esta composição biológica favorece a biodiversidade da flora desta região (SILVA, 2015). A área A3 abriga em seu território importantes sub-bacias afluentes: o Rio Brumado com seus contribuintes, Riacho das Pedras, Rio Santo Antônio, Rio da Fazendola, um dos principais afluentes, Rio da Água Suja, também um importante afluente do Alto Rio das Contas. A área A3, além de bem preservada, possui importância no

fornecimento de recursos hídricos para o estado da Bahia (SILVA, 2015), fatores estes que podem explicar a leve tendência de aumento da PPB e PPL para este local.

A paisagem sobre A4 é constituída por diversos ecossistemas frágeis e pouco consolidados, onde inúmeros processos erosivos e de deposição atuam sobre a área (PACHECO *et al*. 2016). Os principais contribuintes para o processo de vulnerabilidade dunar são: fatores antrópicos, velocidade do vento, erosão dunar, variação sazonal das chuvas e práticas agrícolas (PACHECO *et al.* 2016). A velocidade do vento influência nos processos de acreção (ganho ou acúmulo dos sedimentos que são trazidos do entorno, por meio do transporte eólico). Além disso, estudos sobre o processo de evolução natural do relevo, mostram que a ocupação indevida das encostas, sobretudo para o desempenho da agropecuária, aumenta o regime de sedimentação na calha fluvial, como consequência da erosão (PACHECO *et al*. 2016).

Dentre as quatro áreas estudadas, A3 possui território mais preservado da vegetação em relação as outras áreas, além da contribuição da hidrologia local para manutenção da vegetação mesmo em situação de aumento da temperatura do ar e redução das chuvas. As outras áreas, apesar de serem hoje unidades de conservação, já sofreram certo grau de degradação, e em períodos de maior temperatura do ar e redução da chuva, há redução do incremento de carbono em sua biomassa. Porém, quando aumenta precipitação nessas regiões, a vegetação responde através do aumento da PPB e PPL.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados analisados, observou-se que o ganho de carbono é maior na estação chuvosa. Os resultados também mostraram que está havendo uma diminuição da chuva e aumento da temperatura em todas as quatro áreas analisadas o que pode influenciar no sequestro de carbono. O comportamento médio das variáveis precipitação, produtividade primária bruta e para o período de 2001 a 2019 mostrou redução para todas as áreas, com exceção de A3 em que foi observado um leve aumento da produtividade primária bruta e, consequentemente, da produtividade primária líquida. Os corpos d'água que circundam A3 podem ser o fator chave para a manutenção da vegetação. O aumento da temperatura do ar e redução das chuvas observados em todos os locais estudados foi não significativo

estatisticamente para A3, podendo indicar um *feedback* positivo da manutenção da vegetação em relação ao clima, mantendo a sua produtividade estável.

Não é possível afirmar se as mudanças de temperatura do ar e chuva impulsionarão (ou impulsionaram) a substituição da vegetação de Caatinga, mas se for somado este fator a degradação da vegetação por atividade antrópica é possível que o processo de desertificação possa ser um cenário presente na região. Deve-se levar em consideração a importância da manutenção de cada reserva para que a ação antrópica não atue dentro das áreas e o bioma tenha a chance de aumentar sua dinâmica de resiliência frente a mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo financiamento que tornou esta pesquisa possível. O autor P.S. agradece a CAPES pelo apoio através da bolsa PVNS e o CNPq pelo apoio através da bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANTÃO, Cristovam Filipe Nobre. **Seleção e dimensionamento de estruturas de proteção de margens de rios. Aplicações Práticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/143398509.pdf. Acesso em: 26 outubro de 2022.

BACK, Álvaro José. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n.5, v. 36, p. 717-726, 2001.

BASTIAANSSEN, Wim; ALI, Samia. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n. 3, v. 94, p. 321-340. 2003.

BETTS, R.A.; Cox, P.M.; Harris, C.; Huntingford, C.; Jones, C.D. "The role of ecosystematmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming". **Theoretical and Applied Climatology**, n. 78, p. 157-175. 2004.

BRITO MORAIS, Ygor Cristiano *et al*. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 585-599, 2017

CARDOSO, Domingos Benício & QUEIROZ, Luciano Paganucci. Diversidade de Leguminosas nas Caatingas de Tucano, Bahia: Implicações para a Fitogeografia do Semiárido do Nordeste do Brasil. **Rodriguésia,** v. 58, n. 2, p. 379-391. 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rod/a/cWL4FJyR7Gyzjx3LtZWNkZG/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

CHAVES, Rosane Rodrigues. Variabilidade da precipitação na região sul do Nordeste do Brasil e sua associação com padrões atmosféricos. Tese de M.Sc. São José dos Campos, INPE, 159 p., 1999 **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2,3, 1999. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbg/a/HFj66C8sxhcvCjZhNVyDZWB/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

CHAVES, Rosane Rodrigues; CAVALCANTI, Fonseca Albuquerque. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil.

CONTI, José Bueno. O Conceito de Desertificação. CLIMEP. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, Rio Claro. n 2. v. 3, p. 39-52, 2008. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/2091. Acesssado em: 26 de outubro de 2022.

CRUZ, Jocy Brandão *et al*. **Complexo Espeleológico da Furna Feia:** Uma Proposta de Unidade de Conservação. Anais do 30.º Congresso Brasileiro de Espeleologia, SBE. Montes Claros – MG. 2009.

DA SILVA, Francisco Eliézer Lima; BEZERRA, Josué Alencar. Região e Território: um breve olhar sobre a nova delimitação do Semiárido brasileiro. **Revista Homem, Espaço e Tempo**, v. 14, n. 2, p. 66-82, 2020. Disponível em: https://rhet.uvanet.br/index.php/rhet/article/view/457. Acesso em: 19 fev. 2022.

DAAC, ORNL. **MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool.** ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. 2018. Disponível em: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1379. Acesso em: 20 jan. 2019.

DE ALENCAR, Leônidas P. *et al.* Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba–MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, n. 1, v. 7, p. 159-166, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.5039/agraria.v7i1a1170. Acesso em: 20 jan. 2022

de MOURA, Magna Soelma Beserra, *et al.* **Perfil vertical de CO_2 na Caatinga preservada: resultados preliminares.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. Agrometeorologia no século 21: o desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros: anais. Lavras: UFLA, 2015., 2015.

de Sousa, L.C.V.; de Paula, S. F.; V., Satyamurty, P. *et al.* Simulation of air temperature and their influence on the potential distribution of Myracrodruon urundeuva, Copernicia prunifera and Cereus jamacaru in the Caatinga. **SN Appl**. Sci. 4, 26, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42452-021-04886-w. Acesso em: 10 fev. 2022

FERNANDES, Jessicleide Dantas; DE MEDEIROS, Anna Jacinta Dantas. Desertificação no Nordeste: uma aproximação sobre o fenômeno do Rio Grande Norte. **Holos**, v. 3, p. 147-161, 2009. Disponível em: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549227012. Acesso em: 1 fev. 2022.

FERREIRA, Antonio Geraldo; DA SILVA MELLO, Namir Giovanni. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista brasileira de climatologia**, v. 1, n. 1, 2005. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215. Acesso em: 15 fev. 2022

FREIRE, Brena Maria de Lima. **Caatinga como Patrimônio Nacional: efeitos constitucionais da inserção do bioma na proteção do parágrafo 4º, art. 225. 2021. 86f**. 2021. Monografia (Graduação em Direito) - Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/44839. Acesso em: 15 fev. 2022.

GIRARDIN, Martin *et al*. Testing for a CO_2 fertilization effect on growth of Canadian boreal forests, J. **Geophys. Res**., 116, G01012, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2010JG001287. Acesso em: 16 fev. 2022.

HEINSCH, Faith Ann *et al*. Evaluation of Remote Sensing Based Terrestrial Productivity From MODIS Using Regional Tower Eddy Flux Network Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensi**ng, v. 44, n. 7, p. 1908-1925, 2006. DOI: 10.1109/TGRS.2005.853936.

IDSO, Sherwood B.; KIMBALL, Bruce A. Tree growth in carbon dioxide enriched air and its implications for global carbon cycling and maximum levels of atmospheric CO_2. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 3, p. 537-555, 1993. https://doi.org/10.1029/93GB01164.

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods; **Griffin:** London, UK, 1975. Google Scholar, 1975. Disponível em: https://psycnet.apa.org/record/1948-15040-000. Acesso em: 10 fev. 2022.

LEAL, Inara R. *et al*. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, p. 139-146, 2005.

LIBERATO, Ailton Marcolino; BRITO, José Ivaldo. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 170-180, 2010. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232656/26669. Acesso em 26 de outubro de 2022.

LIMA JÚNIOR, C. *et al*. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis (IPEF),** v. 42, p. 289-298, 2014. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1096262. Acesso em: 10 jan. 2022.

LIU Y, *et al*.: Synthesis and pharmacological activities of xanthone derivatives as alpha-glucosidase inhibitors. **Bioorg Med Chem**, v. 14, n. 16, p. 5683-5690, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bmc.2006.04.014.

MAGALHÃES, A. R.; FILHO, H. C.; GARAGORRY, F. L.; GASQUES, J. G.; MOLION, L. C. B.; *et al.* **The effects of climatic variations on agriculture in Northeast Brazil.** In**:** M. L. Parry, T. R. Carter, and N. T. Konijn (eds), The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 2, Assessments in Semi-Arid Regions, pp. 273–380, Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1988.

MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. Econometrica**: Journal of the econometric societ**y, p. 245-259, 1945. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/1907187. Acesso em: 16 fev. 2022.

MARENGO, José A. *et al.* Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, p. 385-422, 2011.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. Oficina de textos, 2017.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, S. de O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, , n. 1, v. 17p. 1-10, 2002. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/327219140/Uma-revisao-da-dinamica-das-chuvas-no-Nordeste-brasileiro-pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

MONCUNILL, David Ferran. **The rainfall trend over Ceará and its implications.** In: Proceeding of.. p. 315-323, 2006.

Monthly Weather Review, 129, 2614-2626, 2001. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/129/10/1520-0493_2001_129_2614_acfawr_2.0.co_2.xml. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

MORAES, J. M. *et al*. **Estudo preliminar da evolução temporal dos componentes do ciclo hidrológico da bacia do Rio Piracicaba.** Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 11, p. 27-32, 1995.

PACHECO, Maria Raquel Pereira dos Santos; HELENE, Maria Elisa Marcondes. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO_2. **Estudos avançados**, v. 4, p. 204-220, 1990.

PAES, Maria Luiza Nogueira; DIAS, I. F. O. **Plano de manejo:** Estação Ecológica Raso da Catarina. Brasília: Ibama, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-40141990000200010.

PETTITT, Anthony N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, n. 2, v. 28, p. 126-135, 1979. Disponível em: https://doi.org/10.2307/2346729. Acesso em: 17 fev. 2022.

PINTO, Eber José de Andrade. **Atlas pluviométrico do Brasil:** metodologia para definição das equações intensidade-duração-frequência do Projeto Atlas Pluviométrico. 2013.

ROCHA, W. F. **Situação da cobertura vegetal do bioma Caatinga. Mudanças Climáticas e Desertificação no Semiárido Brasileiro.** Embrapa Semiárido/Embrapa Informática Agropecuária, Petrolina-PE e Campinas-SP, p. 77-94, 2009.

SA, IB, *et al.* **Mapeamento da cobertura vegetal e uso das terras do Bioma Caatinga**. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL: CLIMA, SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO EN REGIONES SEMI-ÁRIDAS-ICID+ 18, 2., 2010, Fortaleza: CGEE; Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. 2010.

SANTOS, V. de O. **Identificação e análise de tendências em séries históricas de precipitação no município de Uberlândia, Minas Gerais.** XI Encontro Nacional da ANPEGE ENANPEGE, Presidente Prudente. Anais XI Enanpege, 2015.

SENA, Sival Ribeiro de. Uso de dados de sensores remotos na análise das alterações temporais no uso e cobertura da terra na Lagoa de Itaparica, Bahia, Brasil, 2021.

SHUGART, H. H. **CO_2 climatic change and forest ecosystems.** The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. p. 475-521, 1986.

SILVA, Augusto Pedreira, Pereira Ricardo Galeno. **Geossítios:** cenários da geodiversidade da Bahia. Companhia Baiana de Pesquisas Minerais (CBPM). 2015. Disponível em: http://www.cbpm.ba.gov.br/book/geossitios-cenarios-da-geodiversidade-da-bahia/. Acesso em: 15 fev. 2020.

SILVA, Helder José Farias da. **Análise de Tendência e caracterização sazonal e interanual da Evapotranspiração de Referência para o sudoeste da Amazônia Brasileira:** Acre, Brasil. MS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20189. Acesso em: 10 jan. 2022.

SOARES, Deivide Benicio; NÓBREGA, Ranyére Silva; DE OLIVEIRA MOTA FILHO, Fernando. Sobre o Processo de Desertificação (About the Desertification Process). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 1, p. 174-188, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i1.232699. Acesso em: 18 fev. 2022.

SOUSA, Thaiane R. *et al.* Palms and trees resist extreme drought in Amazon forests with shallow water tables. **Journal of Ecology**, n. 5, v. 108, p. 2070-2082, 2020. Disponível em: https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1365-2745.13377. Acesso em: 18 fev. 2022.

TANAJURA, Clemente Augusto Souza; GENZ, Fernando; ARAÚJO, Heráclio Alves de. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100**. Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 345-358, 2010. Disponível em: https://scite.ai/reports/mudancas-climaticas-e-recursos-hidricos-J9LmYk. Acesso em: 18 fev. 2022.

VIEIRA, Valmir Rocha. **Regionalização e riscos de índices de chuvas intensas no Nordeste do Brasil Campina Grand**e. Dissertação (mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. 2014. Disponível em: http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad_met/dissertacoes/ValmirRochaVieira_2014.pdf > Acesso em: 26 de outubro de 2022.

WALTER, H.; LIETH, H. Klimadiagramm-Weltatlas.– Jena. Gustav Fisher, 1960.

ZHANG, Yulong et al. Spatial–temporal variability of terrestrial vegetation productivity in the Yangtze River Basin during 2000–2009. **Journal of Plant Ecology**, v. 7, n. 1, p. 10-23, 2014.