



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Desenvolvimento de Modelo que Estima o Impacto do CO₂ Atmosférico nas Precipitações do Estado de Pernambuco, utilizando ARIMA

Josicléda Domiciano Galvinctio. e-mail: josicleda.galvinctio@ufpe.br (autor correspondente). Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Ciências Geográficas. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente-PRODEMA. Bolsista de pesquisa do CNPq. Pesquisador Mentor da Agência Pernambucana de Água e Clima-APAC

Gabrielly Gregorio da Luz. E-mail: gabrielly.gregorio@ufpe.br Bolsista de PIBIC do CNPq. Graduanda em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE.

Artigo recebido em 27/02/2021 e aceito em 25/06/2021

RESUMO

Sabe-se que o estado de Pernambuco sofrerá impactos na precipitação devido ao aumento de CO₂ na atmosfera. Na tentativa de contribuir nos prognósticos desses impactos este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo que faça prognóstico ou crie cenários futuros para o estado de Pernambuco. Para tanto, foi utilizado o método autorregressivo de médias móveis, ARIMA. O ajuste do modelo foi realizado utilizando a função Bayesian information criterion normalizada. Os resultados mostraram que o modelo desenvolvido apresenta um forte ajuste. O modelo foi melhor ajustado para o Agreste e Oeste do estado. O modelo projeta uma tendência de diminuição da precipitação para o oeste do estado de Pernambuco de aproximadamente 15% abaixo da média histórica até 2027. O modelo projetou precipitações acima da média histórica para o Agreste de Pernambuco, de aproximadamente 17%, até 2027. Conclui-se que ocorrerá com maior frequência anos chuvosos no Agreste de Pernambuco e teremos com maior frequência anos secos no oeste do estado. Na aplicação dos resultados deste estudo e simulação com o modelo SUPER-Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco conclui-se que ocorrerá mais picos de cheias na bacia do Mundaú até 2027.

Palavras-Chave: Cenários, mudanças climáticas, precipitação, recursos hídricos.

Development of a Model that Estimates the Impact of Atmospheric CO₂ on Precipitation in the State of Pernambuco, using ARIMA

ABSTRACT

It is known that the state of Pernambuco will suffer impacts on precipitation due to the increase in CO₂ in the atmosphere. In an attempt to contribute to the prognosis of these impacts, this study aims to develop a model that makes a prognosis or creates future scenarios for the state of Pernambuco. For that, the autoregressive method of moving averages, ARIMA, was used. The model adjustment was performed using the normalized Bayesian information criterion function. The results showed that the developed model presents a strong fit. The model was better adjusted for the Agreste and West of the state. The model projects a precipitation decrease trend for the western state of Pernambuco of approximately 15% below the historical average until 2027. The model projected rainfall above the historical average for the Agreste of Pernambuco, of approximately 17%, until 2027. It concludes It is believed that rainy years will occur more frequently in the Agreste region of Pernambuco, and we will have more frequent dry years in the west of the state. In applying the results of this study and simulation with the model SUPER-System of Hydrological Response Units for Pernambuco, it is concluded that there will be more flood peaks in the Mundaú basin until 2027.

Keywords: Scenario, climate change, rainfall, water resources.

Introdução

As mudanças climáticas têm sido notadas em diversas partes do mundo devido os desastres naturais cada vez mais intensos e frequentes. Nos últimos dois anos o mundo inteiro parou devido a pandemia da COVID 19 que tem causado mortes no mundo inteiro. Mais

recentemente tem sido destaque na imprensa internacional desastres ocorrendo na EUROPA devido as mudanças climáticas globais. Independente da pandemia vem mais uma vez à tona a importância de se preocupar com as mudanças climáticas globais uma vez que o índice

de mortalidade relacionado aos desastres naturais é muito alto no mundo inteiro.

Sabe-se que o aumento de CO₂ na atmosfera tem sido apontado pelo IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change como um dos grandes vilões das mudanças climáticas globais. Assim, estudos que venham a contribuir na discussão dos impactos do aumento de CO₂ em diferentes áreas do conhecimento se torna cada dia mais necessários e importantes. Os planejamentos dos recursos hídricos, dos ambientes de costa e agricultura são tão importantes como outras ações de sobrevivência humana.

Muitos pesquisadores no mundo têm unidos esforços ao longo de muitas décadas na tentativa de mostrar os impactos do aumento de CO₂ atmosférico no clima do Wigley e Jones, (1985).

O estado de Pernambuco tem alta variabilidade climática com cinco mesorregiões geográficas distintas devido as condições climáticas e sistemas atmosféricos causadores de chuva. Essa alta variabilidade torna o estado uma área de grande desafio de planejamento para políticas públicas, principalmente aquelas relacionadas ao clima. Em todas as cinco regiões do estado de Pernambuco há muita dependência econômica devido as condições climáticas. Assim, avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o estado de Pernambuco diz respeito ao seu desenvolvimento econômico e social, e desafios de políticas públicas tendo como apoio o conhecimento ambiental, climático e hídricos. Diversos estudos têm sido realizados para contribuir na melhoria de políticas públicas em Pernambuco, Bandin e Galvncio (2021); Lima et al., (2021); Galvncio et al., (2020); Santos et al., (2020); Lacerda et al., (2020); Soares e Galvncio (2020); Galvncio e Naue (2020), Galvncio (2019), Freire et al., (2019); Bezerra et al., (2019); Machado et al., (2014); Gusmão et al. (2012) Silva et al (2011); Galvncio e Moura (2010); Fernandes et al (2009).

Galvncio (2021) avaliou o impacto do CO₂ atmosférico nas precipitações do estado de Pernambuco e observou que elas serão fortemente impactadas no agreste e litoral com possíveis consequências no balanço hídrico das bacias hidrográficas, levando a ocorrência mais cheias e inundações.

É importante ressaltar que não apenas conhecer as relações existentes entre as mudanças climáticas e as precipitações atuais é preciso realizar prognósticos e criar cenários futuros para que possamos mitigar os efeitos das mudanças climáticas sobre o estado de Pernambuco. Para tal, será necessário desenvolver modelos que estimem

os impactos das mudanças climáticas sobre diferentes áreas, social, econômica e ambiental e assim fazer previsões de médio, longo e curto prazo. Somente assim será possível realizar planejamento eficaz e eficiente.

Muitos estudos têm sido realizados com o intuito de desenvolver modelos que estimem a variação espacial e temporal da precipitação, com métodos estatísticos, Medeiros et al., (2019); Dantas et al., (2016); Santos et al., (2012A); Santos et al., (2012B).

Apesar de saber que estimativas de precipitações não são fáceis de se realizar devido à complexidade da dinâmica atmosférica encontrar relação entre variáveis pode levar ao desenvolvimento de bons modelos levando em considerações principais variáveis impactantes.

Diante do exposto e na tentativa de fazer prognósticos ou previsão que estime o impacto do aumento de CO₂ na atmosfera nas precipitações do estado de Pernambuco o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo que estime os impactos do aumento de CO₂ na precipitação.

Material e métodos

A área em estudo é o estado de Pernambuco, Figura 1. O estado possui uma alta variabilidade climática espacial e temporal. Esse estado é dividido em cinco mesorregiões geográficas. Essas mesorregiões possuem características climáticas similares. A precipitação média mensal no estado de Pernambuco não ultrapassa 400mm, sendo os meses de janeiro a maio mais chuvosos no sertão e nos meses de maio a setembro mais chuvosos no agreste e litoral, Galvncio (2021).

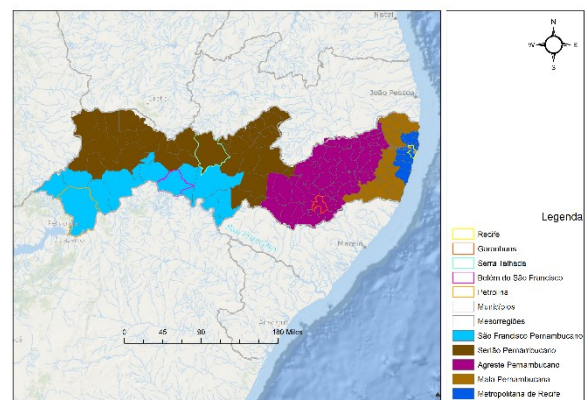


Figura 1 – Localização espacial do estado de Pernambuco.

Dados utilizados

Foram utilizados dados mensais de CO₂ disponíveis no site da NOAA, no Mauna Loa no Hawaii, do período de 1990 a 2021, site <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Os dados de precipitação mensal observados nos municípios de Recife, Garanhuns, Serra Talhada, Belém do São Francisco e Petrolina foram obtidos no site da Agência Pernambucana de Águas e Clima-APAC, para o mesmo período, ou seja, uma série de 31 anos de dados. A escolha das estações se deu de forma que os municípios representassem as condições climáticas das cinco mesorregiões e são municípios que se destacam em desenvolvimento econômico no estado de Pernambuco.

Metodologia

Neste estudo foi utilizado o modelo autoregressivo integrado de médias móveis (autoregressive integrated moving average-ARIMA, na sigla em inglês). Segundo Dantas (2020), quando se trabalha com séries temporais meteorológicas muitas vezes é necessário, a utilização do recurso da defasagem na série transformada, para que se possa obter por intermédio de algumas diferenciações a estacionariedade da série, daí uma possibilidade 'usar ou aplicar os Modelos Autoregressivos Integrados de Médias Móveis ou ARIMA (p, d, q).

Crítérios de avaliação do ajuste do modelo

O principal critério de avaliação do ajuste do modelo foi função BIC (Bayesian information criterion) normalizada. Ao escolher entre vários modelos, é preferível aquele com o BIC mais baixo. O BIC é uma função crescente da variância do erro e uma função crescente de K. Ou seja, a variação inexplicada na variável dependente e o número de variáveis explicativas aumentam o valor do BIC. Portanto, um BIC mais baixo implica menos variáveis explicativas, melhor ajuste ou ambos. A força da evidência contra o modelo com o valor de BIC mais alto pode ser resumida na Tabela 1.

Além do BIC também foram avaliados os ajustes dos modelos com os seguintes métodos:

1 Stationary R-squared (R-quadrado estacionário) que é uma medida que compara a parte estacionária do modelo a um modelo médio simples. Valores negativos significam que o modelo em consideração é pior do que o modelo de linha de base. Valores positivos significam que o modelo em consideração é melhor do que o modelo de linha de base.

2 . R-quadrado (R²) é uma medida estatística que representa a proporção da variância para uma

variável dependente que é explicada por uma variável independente ou variáveis em um modelo de regressão. Também pode ser conhecido como coeficiente de determinação. Quanto mais próximo de 1 mais ajustado está o modelo.

Tabela 1- Variação de Bayesian information criterion-BIC normalizada e força de ajuste do modelo.

ΔBIC	Ajuste do modelo
0 a 2	Não vale mais do que uma simples menção
2 a 6	Positivo
6 a 10	Forte
>10	Muito forte

3- RMSE (root mean square error): é a medida que calcula "a raiz quadrática média" dos erros entre valores observados (reais) e previsões (hipóteses), equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (\text{eq.1})$$

Em que n é o número de valores da variável, $\hat{y}$ é a média da variável e y_i é o valor de cada variável.

4- MAE (erro médio absoluto): cálculo o "erro absoluto médio" dos erros entre valores observados (reais) e previsões (hipóteses), equação 2.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (\text{Eq.2})$$

O RMSE e MAE expressam o erro médio do modelo preditivo, em relação aos dados originais. Estão no intervalo 0-infinito e retornam a magnitude dos erros e não sua direção. Quanto menor, melhor em ambos os casos. Quando se distanciam seria necessário ver qual método seria melhor adotar.

5- MAPE O erro percentual absoluto médio (MAPE), também conhecido como desvio percentual absoluto médio (MAPD), é uma medida da precisão da previsão de um método de previsão nas estatísticas. Geralmente expressa a precisão como uma proporção definida pela fórmula:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (\text{eq. 3})$$

Em que A_t é o valor real e F_t é o valor da previsão. Sua diferença é dividida pelo valor real A_t . O valor absoluto nesta relação é somado para cada ponto previsto no tempo e dividido pelo número de pontos ajustados n .

6- MaxAPE MAXAPE. MaxAPE. Erro máximo de porcentagem absoluta. O maior erro previsto, expresso em porcentagem. Essa medida é útil para imaginar um cenário de pior caso para suas previsões.

7- MAXAE. MaxAE. Erro máximo absoluto. O maior erro previsto, expresso nas mesmas unidades das séries dependentes. Como o MaxAPE, é útil para imaginar o pior cenário para suas previsões.

Fonte de descrição dos critérios adotados acima

<https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/SaaS?topic=tsmodel-goodness-fit-measures-command>

Simulação de cenários futuros

O modelo desenvolvido foi testado para fazer simulação de 2021 a 2027. Os dados de CO₂ utilizados como entrada no modelo foram simulados considerando a taxa de crescimento anual do CO₂ observados nos últimos 10 anos, 2010-2020. A taxa de crescimento do CO₂ esteve sempre acima de 2ppm/ano. Para criar um cenário mais otimista possível foi utilizado uma taxa anual de crescimento de 2ppm considerando o ano de 2020 como partida para simulação do CO₂.

Após obtenção da série de CO₂ para o período de 2021-2027 foram estimados os valores das precipitações para os municípios de Petrolina, Belém do São Francisco, Serra Talhada, Garanhuns e Recife, utilizando os modelos ARIMA desenvolvidos para cada município.

Foi utilizado o SUPER-Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco para discutir os resultados com o balanço de hídrico de bacias de Pernambuco, site: <https://super.hawqs.tamu.edu/>

O Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco (SUPER) é um sistema interativo de modelagem hidrológica e de qualidade de água que utiliza como mecanismo de modelagem a Ferramenta de Avaliação do solo e da Água -Soil and Water Assessment Tool (SWAT). O SUPER fornece uma interface interativa da web e mapas; dados de entrada pre-carregados; resultados que incluem tabelas, gráficos e dados de saída; um guia do usuário, e projetos de modelagem com desenvolvimento, execução e armazenamento online para os usuários, Galvinctio (2021).

Resultados e discussão

A Tabela 2 mostra a descrição do modelo. para o estado de Pernambuco foram obtidos cinco modelos, um para cada mesorregião. Foi aplicado o método ARIMA para encontrar um modelo que estime ou crie cenários dos impactos do aumento de CO₂ (mudanças climáticas) nas precipitações no estado de Pernambuco. Foi testado diferentes combinações de ARIMA e foi identificado as melhores combinações, sendo para Petrolina (2,0,5), Serra Talhada (2,0,1), Garanhuns (2,0,8), Belém do São Francisco (2,0,6) e Recife (1,0,0). Para essas combinações obteve-se os seguintes resultados estatísticos apresentados na Tabela 3. Considerando o BIC o modelo foi é robusto e possui um forte ajuste.

Tabela 2- Descrição do modelo.

			Tipo do modelo
Model ID	Petrolina	Model_1	ARIMA(2,0,5)
	Serra Talhada	Model_2	ARIMA(2,0,1)
	Garanhuns	Model_3	ARIMA(2,0,8)
	Belém do São Francisco	Model_4	ARIMA(2,0,6)
	Recife	Model_5	ARIMA(1,0,0)

A Tabela 3 mostra os parâmetros de avaliação dos modelos recomendados neste estudo. Nota-se o BIC esteve entre 8 e 10 apresenta-se assim um forte ajuste. O maior R² foi de 0,4 para Garanhuns. Mostra-se que o modelo é mais robusto para estimar os impactos do aumento de CO₂ atmosférico na precipitação do Agreste de

Pernambuco. O RMSE e MAE são critérios de ajuste que reforça a precisão do modelo do Agreste, Tabela 4. Considerando todos os critérios o melhor modelo seria o proposto para Garanhuns.

Os parâmetros dos modelos ARIMA estão apresentados na Tabela 5. Sendo o modelo 1 para Petrolina, o modelo 2 para Serra Talhada, o modelo

3 para Garanhuns, o modelo 4 para Belém do São Francisco e o modelo 5 para Recife.

A Figura 2 mostra o resíduo da autocorrelação e da autocorrelação parcial. Nota-se que os primeiros lags apresentam as menores correlações, abaixo de 0,2. Esses valores são a sobra depois do ajuste do modelo. Isso mostra que os modelos captaram adequadamente as informações dos dados. Os resíduos nos primeiros lags não estão correlacionados ou estão com baixa correlação. As médias dos resíduos para o primeiro lag foi muito próxima de zero. O ideal é que o resíduo seja zero que tenhamos um ótimo modelo, mas isso não significa que esse modelo não seja válido apenas que necessita de ser aprimorado.

A Figura 3 mostra a relação entre os dados de precipitação observadas e estimadas pelos modelos para os cinco municípios estudados que pertencem as cinco mesorregiões geográficas do estado de Pernambuco. Nota-se que os modelos respondem bem a variação temporal do padrão de precipitação. Porém, em geral sobrestimam os valores observados. Diante desse resultado, sugere-se que o uso dos modelos para realizar prognósticos e criar cenários de mudanças climáticas é promissor uma vez que não apresentará resultados alarmantes quanto aos impactos do aumento de CO₂ na atmosfera e as mudanças na precipitação do estado de Pernambuco. Ou seja, pode-se considerar que os cenários apontados pelos modelos são os mais otimistas possíveis. Porém, alerta-se que o uso do modelo pode ser usado como diagnostico inicial e que outros modelos mais pessimistas sejam também utilizados para que as decisões de políticas públicas relacionadas as mudanças climáticas em Pernambuco não sejam frouxas ou flexíveis ao ponto de ocorrer impactos irreversíveis econômicos, sociais e ambientais. É importante destacar que algumas políticas públicas relacionadas as mudanças climáticas precisam ser mais duras e que estancem ações de comprometimento ambiental. Em geral, num meio de incertezas quanto aos impactos das mudanças climáticas sempre há preferência de políticas públicas mais frouxa (ou flexível) do que num contexto de menor incerteza.

As análises estatísticas apresentadas até aqui têm mostrado que os modelos produzem previsões que parece dar conta de todas as informações dos dados utilizados neste estudo. A média dos resíduos é próxima de zero e não há correlação significativas na série dos resíduos. A Figura 5 mostra que a variação dos resíduos permanece praticamente a mesma nos dados históricos, a variância residual pode ser tratada como constante.

Cenários de aumento de CO₂ Global

A Figura 4 mostra a projeção de CO₂ na atmosfera considerando a taxa de crescimento dos últimos 10 anos (2010-2020) de acordo com os dados da NOAA utilizados neste estudo. Nota-se que o CO₂ pode ultrapassar 430ppm. A Figura 5 mostra a variação do CO₂ de toda série utilizada neste estudo.

Impactos do CO₂ para Pernambuco até 2027

A Figura 6 mostra a precipitação mensal para os municípios estudados estimadas, observadas e projetadas. Em geral, o modelo sobrestima. Isso significa dizer que as projeções são as mais otimistas possíveis. O modelo projeta uma tendência de diminuição da precipitação para Petrolina, Serra Talhada e Belém do São Francisco, sendo mais eficiente para Petrolina e Belém do São Francisco. Para Serra Talhada projeta apenas a tendência de diminuição. Para Petrolina projeta uma diminuição de 15% da precipitação até 2027. As projeções são de chuvas abaixo da média histórica para os próximos cinco anos. Para Garanhuns projeta precipitações acima da média histórica de 17%. Ou seja, teremos anos mais chuvosos. Destacamos Petrolina e Garanhuns devido os modelos estarem melhor ajustados.

Impactos do aumento de CO₂ nos recursos hídricos de Pernambuco

Para avaliar o impacto do CO₂ no balanço hídrico das bacias de Pernambuco para este estudo escolheu as bacias do Pontal e do Mundaú. Essas bacias foram escolhidas devido os modelos ARIMA aqui desenvolvidos terem respondido melhor para Petrolina/oeste do estado de Pernambuco e Garanhuns/Agreste do estado de Pernambuco.

A avaliando a Figura 7 é possível perceber que os maiores impactos ocorrerão no escoamento superficial, no escoamento lateral e na umidade do solo. Nota-se uma diminuição de 75% no escoamento superficial, 20% no escoamento lateral e 44% na umidade do solo. Para a bacia do Mundaú, Figura 8 com a simulação de aumento de 17% na precipitação ocorrerá um aumento de 7% na evapotranspiração, aumento de 40% no escoamento superficial, aumento de 16% no escoamento lateral, aumento de 33% na percolação e um aumento de 40% no fluxo de base. Isso significa que teremos muita água disponível no leito do rio principal e possivelmente mais enchentes e inundações nos municípios do litoral de Pernambuco e Alagoas banhados pela bacia do Mundaú.

Tabela 3 – Parâmetros de avaliação do modelo.

Parâmetros estatísticos	Média	SE	Mínimo	Máximo	Percentis						
					5	10	25	50	75	90	95
Stationary R-squared	.307	.089	.164	.379	.164	.164	.222	.355	.368	.379	.379
R-squared	.110	.238	-.130	.401	-.130	-.130	-.079	-.021	.365	.401	.401
RMSE	73.313	28.903	50.743	122.557	50.743	50.743	54.317	60.403	98.765	122.557	122.557
MAPE	676.660	419.973	285.216	1385.802	285.216	285.216	402.162	519.935	1029.522	1385.802	1385.802
MaxAPE	32369.402	18780.091	12087.963	55543.060	12087.963	12087.963	13596.506	34029.392	50312.304	55543.060	55543.060
MAE	53.874	23.786	38.059	94.546	38.059	38.059	38.584	42.124	75.040	94.546	94.546
MaxAE	380.438	87.460	263.025	498.473	263.025	263.025	306.295	368.470	460.565	498.473	498.473
Normalized BIC	8.593	.662	7.999	9.669	7.999	7.999	8.105	8.328	9.213	9.669	9.669

Tabela 4- Estatísticas dos modelos

Modelos	Números de preditores	Critérios de avaliação								Ljung-Box Q(18)			Number of Outliers
		Stationary R-squared	R-squared	RMSE	MAPE	MAE	MaxAPE	MaxAE	Normalized BIC	Statistics	DF	Sig.	
Petrolina-Model_1	1	.379	-.130	60.403	519.935	39.108	12087.963	368.470	8.328	23.313	13	.038	0
Serra Talhada-Model_2	0	.280	-.021	74.974	519.107	55.534	15105.048	422.658	8.757	154.365	16	.000	3
Garanhuns-Model_3	1	.355	.401	50.743	673.241	38.059	45081.548	263.025	7.999	83.122	14	.000	3
Belém do São Francisco-Model_4	0	.164	-.028	57.891	1385.802	42.124	55543.060	349.564	8.211	95.590	14	.000	0
Recife-Model_5	0	.357	.329	122.557	285.216	94.546	34029.392	498.473	9.669	184.470	17	.000	1

Tabela 5 - Parâmetros do modelo ARIMA.

					Estimativa	SE	t	Sig.		
					a					
Petrolina-Model_1	Petrolina	Natural Log	Constant		6.631	1.589	4.173	.000		
			AR	Lag 1	1.727	.005	377.083	.000		
				Lag 2	-.996	.004	-242.237	.000		
			MA	Lag 1	1.706	.346	4.937	.000		
				Lag 2	-1.013	.412	-2.460	.014		
				Lag 5	.009	.026	.364	.716		
Serra Talhada-Model_2	Serra Talhada	Natural Log	Média de CO2 mensal	No Transformation	Numerator	Lag 0	-.010	.004	-2.486	.013
			Constant		3.382	.137	24.777	.000		
			AR	Lag 2	.260	.069	3.760	.000		
			MA	Lag 1	-.458	.065	-7.027	.000		
Garanhuns-Model_3	Garanhuns	Square Root	AR	Lag 2	.235	.059	3.972	.000		
			MA	Lag 1	-.383	.054	-7.141	.000		
				Lag 5	.211	.051	4.136	.000		
				Lag 8	.156	.052	3.027	.003		
			Média de CO2 mensal	No Transformation	Numerator	Lag 0	.019	.001	31.455	.000
Belém do São Francisco-Model_4	Belem do São Francisco	Natural Log	Constant		2.591	.089	29.045	.000		
			AR	Lag 2	.200	.061	3.259	.001		
			MA	Lag 1	-.167	.064	-2.621	.009		
				Lag 5	.191	.067	2.870	.004		
				Lag 6	.189	.071	2.662	.008		
Recife-Model_5	Recife	Square Root	Constant		11.197	.611	18.333	.000		
			AR	Lag 1	.590	.045	13.203	.000		

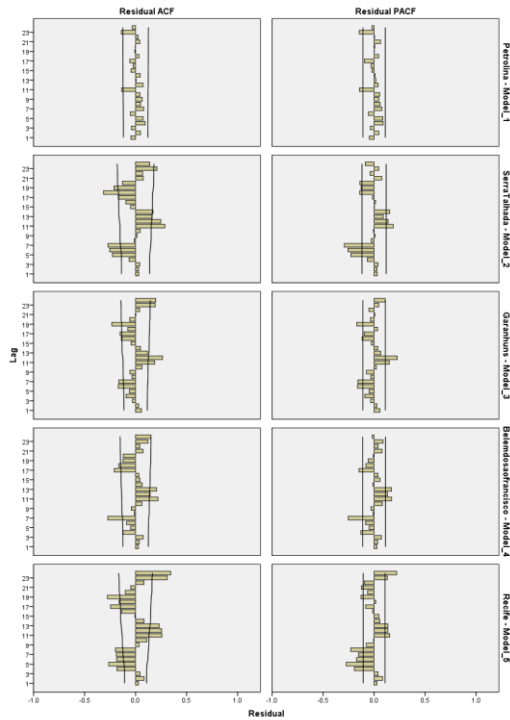


Figura 2- Resíduo da autocorrelação parcial.

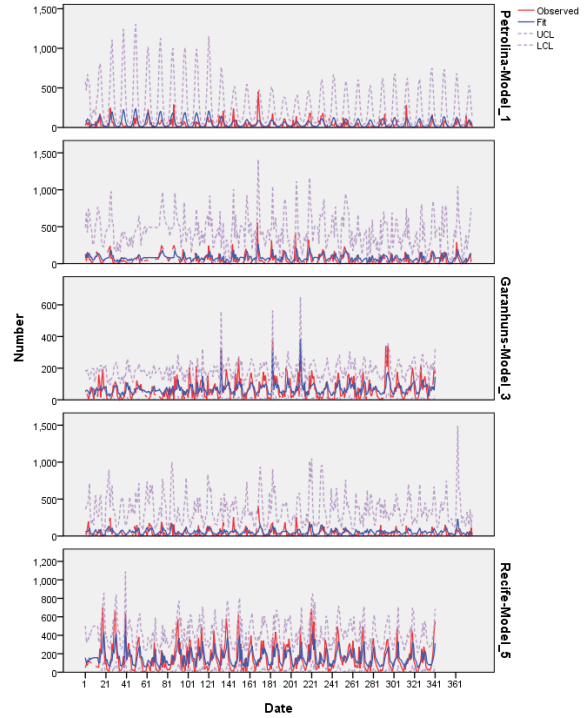


Figura 3 -Relação entre as precipitações observadas e estimadas pelos modelos, Petrolina, Serra Talhada, Garanhuns, Belém do São Francisco e Recife, respectivamente.

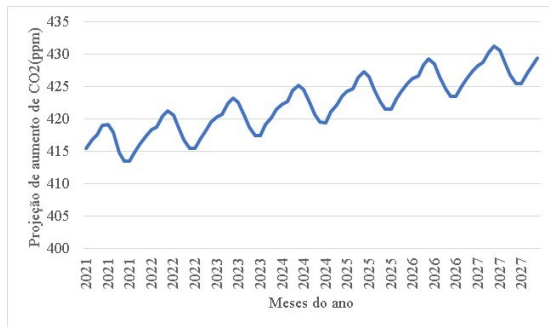


Figura 4- Projeção do CO2 de 2021 a 2027.

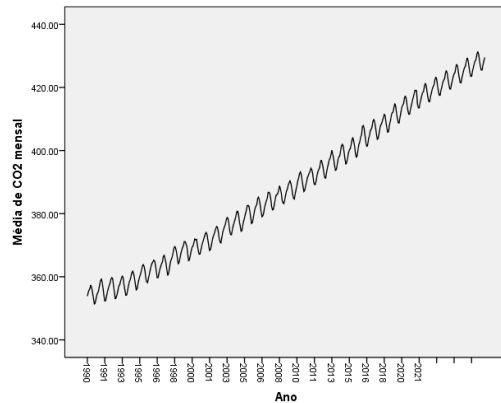


Figura 5 – Variação do CO2 de 1990 a 2027.

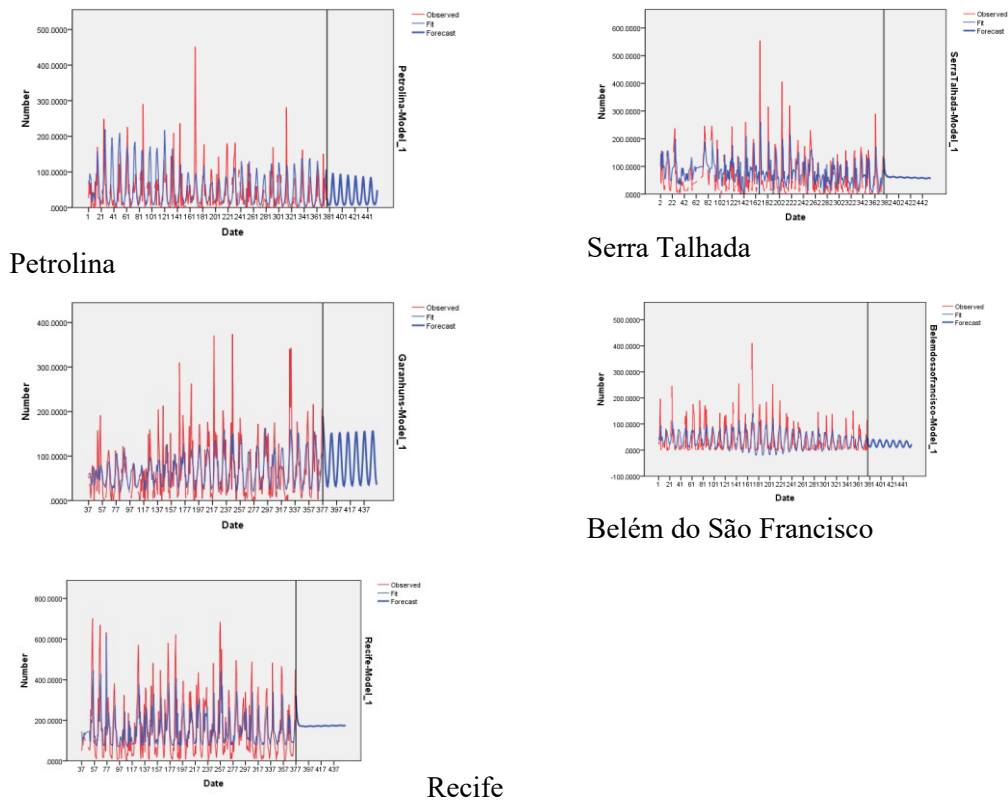


Figura 6- Precipitação mensal projetada até 2027.

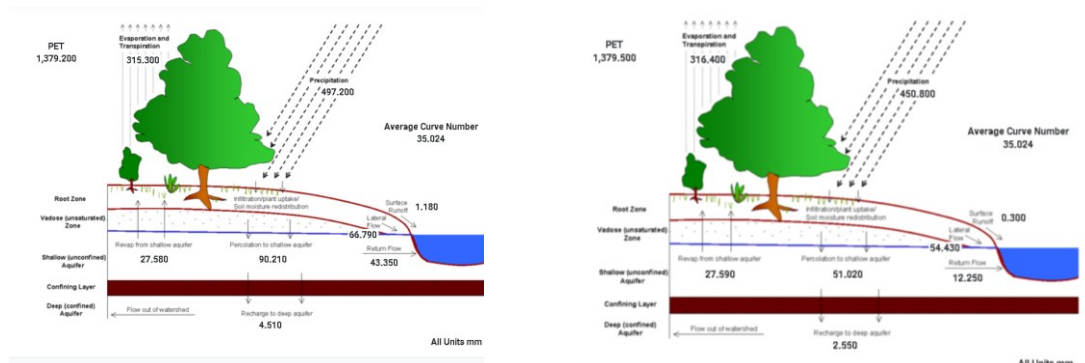


Figura 7 -Balanço hídrico anual da bacia do Pontal.

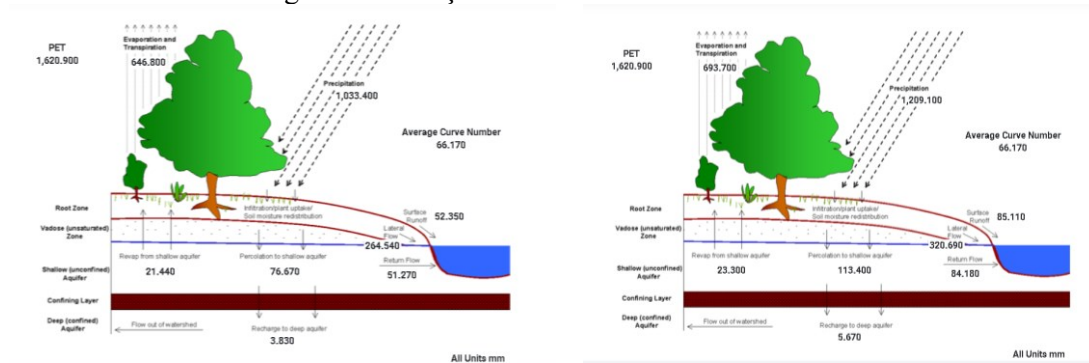


Figura 8 -Balanço hídrico anual da bacia do Mundau.

Segundo o IPCC, (2013 a 2020), para mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais e garantir um clima minimamente estável às futuras gerações, será preciso reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa até 2040 e, a partir daí, retirar carbono da atmosfera em grandes quantidades. Esse é o principal alerta que o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Para Pernambuco será preciso adotar políticas públicas urgentes de mitigação aos impactos das mudanças climáticas. As projeções para 2027 já pontam problemas sérios relacionados ao aumento de CO₂ na atmosfera.

Diversos estudos no mundo têm realizado pesquisa semelhante ao deste estudo e tem obtido resultados similares, Dimri et al., (2020). Segundo os autores as informações dos padrões de tendências podem auxiliar na previsão e melhorar as práticas de gestão da água.

Conclusões

Desenvolveu-se um modelo que estima o impacto do CO₂ no estado de Pernambuco. O modelo foi melhor ajustado para o Agreste e Oeste do estado. O modelo projeta uma tendência de diminuição da precipitação para o oeste do estado de Pernambuco de aproximadamente 15% abaixo da média histórica até 2027. Conclui-se que ocorrerá com maior frequência anos secos no oeste do estado.

O modelo projetou precipitações acima da média histórica para o Agreste de Pernambuco, de aproximadamente 17%, até 2027. Conclui-se que ocorrerá com maior frequência anos chuvosos no Agreste de Pernambuco.

Na aplicação dos resultados deste estudo e simulação com o modelo SUPER-Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco conclui-se que ocorrerá mais picos de cheias na bacia do Mundaú até 2027.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade de pesquisa e bolsa de PIBIC, através do processo 302934/2018-9, a FACEPE e Agência Pernambucana de

Água e Clima pelo apoio ao projeto processo número BPV-00.10-3.07/21

Referências

- Al Sayah, M.J., Abdallah, C., Khouri, M. *et al.* 2021. A framework for climate change assessment in Mediterranean data-sparse watersheds using remote sensing and ARIMA modeling. *Theor Appl Climatol* 143,639–658 (). <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03442-7>.
- Bandim, C.G.A., Galvêncio, J.D. 2021. Mapping water storage areas in depression, using lidar data: Caxangá avenida case study | Mapeamento das áreas de armazenamento de água em depressão, usando dados lidar: Estudo de caso avenida caxangá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 58–67.
- Bezerra, J., Andrade, J., Melo, F., Vigoderis, R., Galvêncio, J., Souza, W. 2019. Degradation of the Vila Maria Spring in Garanhuns–PE. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9(6), 320-329. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.6.p320-329>.
- Dantas, L. G.; Santos, C. A. C.; Olinda, R. A. ; Brito, J. I. B. ; Santos, C. A. G. ; Martins, E. S. P. R. ; Oliveira, G. ; Brunsell, N. A. . 2020. Rainfall Prediction in the State of Paraíba, Northeastern Brazil Using Generalized Additive Models. *Water* 12, 1/2478-26.
- Dantas, L. G. Santos, C. A. C., Olinda, R. A. 2015. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em campina grande - PB. *Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)*, 30, 423-434.
- Dantas, L. G.; Santos, C. A. C.; Olinda, R. A. 2016. Resampling series rainfall in the state of Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 997-1006.
- Dimri, T., Ahmad, S. & Sharif, M. 2020. Time series analysis of climate variables using seasonal ARIMA approach. *J Earth Syst Sci* 129, 149 <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01408-x>.
- Fernandes, J. G.; Freire, M. B. G. dos S.; Cunha, J. C.; Galvêncio, J. D.; Corrêa, M. M.; Santos, P. R. dos. 2009. Qualidade

- físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. *Agrária* (Recife. Online), 4, 27-34.
- Galvêncio, J. (2021). Impacto do aumento de CO₂ nas Precipitações do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 1828-1839. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1828-1839>.
- Galvêncio, J.D., Mendes, S.M., Souza, W.M., De Moura, M.S.B., Santos, W. 2020. Linear correlation between rainfall and leaf area index of the Caatinga biome | Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do bioma Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 3304–3314.
- Galvêncio, J., Naue, C. 2020. Estimation of NDVI with visible images (RGB) obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9(6), 407-420. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.6.p407-420>
- Galvêncio, J. 2019. Estimation of surface temperature with images obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9(6), 397-406. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.6.p397-406>
- Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B. 2010. Detecting Hydroclimatic Changes Using Spatio-Temporal Analysis in The Sub-Medium São Francisco-PE basin. *Journal of Environmental Hydrology*, 18, 1-14.
- Gusmao, A. C. V. L.; Silva, B. B.; Montenegro, S. M. G. L.; Galvêncio, J. D. 2012. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* (Online), 16, 1107-1114.
- IPCC, 2020: AR6 Climate Change 2021: Mitigation of Climate Change.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Lacerda, A.C., Galvêncio, J.D., Morais, Y.C.B., Pimentel, R.M.M., de Moura, M.S.B. 2020. Edapho-topo-climatic influence on gross primary production in semi-arid | Influência topoedafoclimática na produção primária bruta no semiárido. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 3119–3135.
- Lima, C.E.S.D., Costa, V.S.D.O., Galvêncio, J.D., Silva, R.M.D., Santos, C.A.G. 2021. Assessment of automated evapotranspiration estimates obtained using the GP-SEBAL algorithm for dry forest vegetation (Caatinga) and agricultural areas in the Brazilian semiarid region. *Agricultural Water Management*, 250, 106863.
- Machado, C.C.C.; Silva, B. B. Albuquerque, Manoel B.; Galvêncio, J. D. 2014. Estimativa do Balanço de energia utilizando imagens TM: Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meteorologia* (Impresso), 29, 55-67.
- Medeiros, E. S.; De Lima, R. R.; Olinda, R. A.; Dantas, L. G.; Santos, C. A. C. 2019. Space-Time Kriging of Precipitation: Modeling the Large-Scale Variation with Model GAMLSS. *Water*, 11, p. 2368-2384.
- Santos, C. A. C.; Dantas, L. G.; Melo, M. M.; Santos, E. G. 2012A. Trends in Indices for Extremes in Daily Precipitation over Idaho - USA. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 05, 852-862.
- Santos, C. A. C.; Brito, J. I. B.; Silva Junior, C. H. F.; Dantas, L. G. 2012B. Trends in Precipitation Extremes over the Northern Part of Brazil from ERA40 Dataset. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4, 836-851.
- Santos, C.V.B., Carvalho, H.F.S., Silva, M.J., Moura, M.S.B., Galvêncio, J.D. 2020. Use of remote sensing in surface temperature analysis in seasonally dry tropical forest | Uso de sensoriamento remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 941–953.
- Silva, T.G.F., Souza, C.A.A., Moura, M.S.B., Leitao, M.V.B.R., Galvêncio,

- J.D. 2019. Energy balance, leaf emission and radiation use efficiency by sugarcane under cultivation with and without straw (Revista Brasileira de Meteorologia) | Erratum: Balanço de Energia, Emissão Foliar e Eficiência do Uso da Radiação pela Cana-de-Açúcar em Cultivo sem e com Palhada. Revista Brasileira de Meteorologia, 34, 349–349.
- Silva, J.B.; Galvêncio, J. D.; Correa, A. C. B.; Silva, D.G.; Machado, C.C.C. 2011. Classificação Geomorfológica dos Estuários do Estado de Pernambuco (Brasil) com Base em Imagens do LANDSAT 5/TM. Revista Brasileira de Geografia Física, 4, 118-133.
- Soares, G.A.S., Galvêncio, J.D. 2020. Using lidar to evaluate ater patterns in urban areas basin: Physiographic characterization of the rio beberibe basin, pe | Uso do lidar para avaliar os padrões hídricos de bacias em áreas urbanas: Caracterização fisiográfica da bacia do rio beberibe-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, 13, 3659–3674.
- Wigley, T.M.L. Jones, P. D. 1985. Influences of precipitation changes and direct CO₂ effects on streamflow. Nature, 314, 149–152.