

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO DE ONDA CURTA PARA A CIDADE DE NATAL, RN

Data de submissão: 12/05/2023

Data de aceite: 03/07/2023

Thiago Gonçalves da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/9247213148151165>

José Augusto Ferreira Neto

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/0401494432064481>

Paula Andressa Alves de Araújo

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/4857107569349842>

Everton Felipe de Souza Pinheiro

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/3226955524305254>

Eduardo Almeida da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/1268120810491801>

Matheus Henrique Bezerra de Melo

Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós Graduação em Meteorologia
Campina Grande - Paraíba
<http://lattes.cnpq.br/2538146023601236>

Albert Smith Feitosa Suassuna Martins

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/1571415337290282>

Israel Walter Hilário da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/5659345555242426>

Lorena Santos da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/9513978742484452>

Glenda Yasmin Pereira de Carvalho

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/0201207894585805>

Raphaelly de Miranda Pereira

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/9486864895797129>

Daniel Felipe da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas.
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/9510085354088329>

RESUMO: O conhecimento dos níveis de irradiância solar que atingem a superfície terrestre é um pré-requisito para várias aplicações. Uma das características da radiação solar é o alto grau de variabilidade temporal, que está relacionado aos padrões climáticos que atuam em cada local. Sendo assim, o presente trabalho propôs realizar um estudo de caso para a cidade de Natal (5,83°S; 32,20°W) sobre o comportamento da radiação de onda curta, utilizando a Irradiância Global Horizontal (GHI) e a Irradiância Difusa Horizontal (DHI), por meio de avaliações estatísticas para dados mensais de satélite disponibilizados pelo site SoDa no período de 2015 a 2020. Os resultados obtidos através dos parâmetros utilizados foram as componentes do boxplot, ou seja, máximos, mínimos, médias e medianas. Também foi empregada uma regressão linear, a fim de identificar tendências positivas ou negativas. Os valores obtidos tanto para o GHI quanto para o DHI mostraram que ambas as séries estudadas apresentaram uma sazonalidade bem definida. O GHI apresentou pouca dispersão de dados com seu valor máximo em torno de 220560 Wh/m² e seu mínimo em 135481 Wh/m². Quando comparados os valores de verão e inverno notou-se que há uma diferença de até 21,7% nos valores mínimos. Já para DHI os dados apresentaram maior dispersão, principalmente entre os meses de janeiro e março, o valor máximo ficou em 13918 e o mínimo em 46944 Wh/m². Quando comparadas as duas estações, verificou-se que a maior diferença fica nos valores médios com 19,1%. No que diz respeito à regressão linear, verifica-se a presença de uma tendência negativa para o GHI e a completa ausência de tendência no que se refere ao DHI.

PALAVRAS-CHAVE: GHI, DHI, parâmetros.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF SHORT WAVE RADIATION FOR THE CITY OF NATAL, RN

ABSTRACT: Knowledge of the levels of solar irradiance that reach the earth's surface is a prerequisite for various applications. One of the characteristics of solar radiation is the high degree of temporal variability, which is related to the climatic patterns that act in each location. Thus, the present study proposed to conduct a case study for the city of Natal (5.83°S; 32.20°W) on the behavior of short wave radiation, using Horizontal Global Irradiance (GHI) and Horizontal Diffuse Irradiance (DHI), through statistical evaluations for monthly satellite data made available by the SoDa website in the period 2015 to 2020. The results obtained through the parameters used were the components of the boxplot, i.e., maximums, minimums, averages and medians. A linear regression was also used in order to identify trends. The values obtained for both GHI and DHI showed that both series studied presented a well-defined seasonality. The GHI showed little data dispersion with its maximum value around 220560 Wh/m² and its minimum in 135481 Wh/m². When the summer and winter values were compared, it was observed that there is a difference of up to 21.7% in the minimum values. For DHI, the data showed greater dispersion, mainly between January and March, the maximum value was 13918 and the minimum at 46944 Wh/m². When comparing the two seasons, it was found that the largest difference is in the mean values with 19.1%. With regard to linear regression, there is the presence of a negative trend for GHI and the complete absence of trend with regard to DHI.

KEYWORDS: GHI, DHI, parameters.

1 | INTRODUÇÃO

Um dos desafios da sociedade contemporânea, segundo Holf (2011), é suprir as demandas de água e energia, decorrentes de diversos fatores, entre eles está o desenvolvimento econômico, o crescimento da população, processos de degradação ambiental e as mudanças climáticas em curso. De acordo com o demonstrado por Chen e Chen (2016), observa-se que as regiões urbanas utilizam 70% da energia global e necessitam de uma grande quantidade de água para o consumo humano e geração de energia. Segundo De Oliveira e Trindade (2018), nos moldes atuais, a crescente demanda e a exploração intensa de combustíveis fósseis tornam a produção de energia insustentável.

Diante desse cenário, no qual há uma grande demanda energética somada à insustentabilidade da produção de energias não renováveis, a utilização de fontes renováveis, tais como eólica, fotovoltaica e termelétrica, tem sido cada vez mais recorrente. Sendo assim, em consequência a esse fato, estudos que visam identificar e apresentar locais com grandes potenciais na geração desses tipos de energia, têm tornado-se cada vez mais comuns, de modo que a quantidade tem crescido de forma excepcional. Dessa forma, entender o comportamento das variáveis que influenciam e geram essas fontes energéticas é de suma importância. Como exemplo a isso, os estudos sobre os índices de

irradiância solar são importantes na geração de energia solar fotovoltaica, a qual é gerada em condições de altos níveis dessa variável.

Assim, o conhecimento sobre os níveis de irradiância solar que atingem a superfície terrestre é um pré-requisito para várias aplicações da energia solar na indústria, na agricultura e em outras atividades relevantes sob o ponto de vista socioeconômico. Para se ter esse conhecimento é necessário mapear o comportamento dos dados disponíveis na superfície terrestre. Varela (2007) discorre que esse procedimento de análise em todo o território nacional é inviável, pois exige incentivos tecnológicos que nem sempre são atendidos, além da mão de obra especializada para instalação e manutenção dos instrumentos de medição de irradiância solar. Segundo Pereira (2006), o Brasil, por situar-se na região tropical próximo à linha do Equador, recebe grande incidência de radiação solar durante todo o ano ao longo de seu território, além de uma menor variabilidade interanual.

Uma das características da radiação solar é um alto grau de variabilidade temporal, que está relacionada aos padrões climáticos que atuam em cada local. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento da radiação de onda curta (ROC), especificamente a Irradiação Global Horizontal (GHI) e a Irradiação Difusa Horizontal (DHI), as quais chegam à superfície da cidade de Natal entre janeiro de 2015 e dezembro de 2020, fazendo uma comparação dos resultados obtidos para o inverno e verão.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo refere-se à capital do Rio Grande do Norte, Natal-RN (5,83°S, 32,20° W)(Fig. 1). Pertence à mesorregião do Leste Potiguar (IBGE, 2020), possuindo uma área territorial de 167,401 km² com uma altitude média de 46 m em relação ao nível médio do mar. Além de uma costa litorânea, a cidade possui pontos de vegetação de Mata Atlântica. Recentemente, Alvares (2014) elaborou, utilizando os critérios de Köppen, a classificação climática do Brasil, de modo que Natal é dito como um local com o clima do tipo As: tropical, com o verão seco. Segundo o INMET, 2021 apresentou as médias de precipitação anual e de temperatura compensada iguais a 1721,4 mm e 26,4 °C, respectivamente.

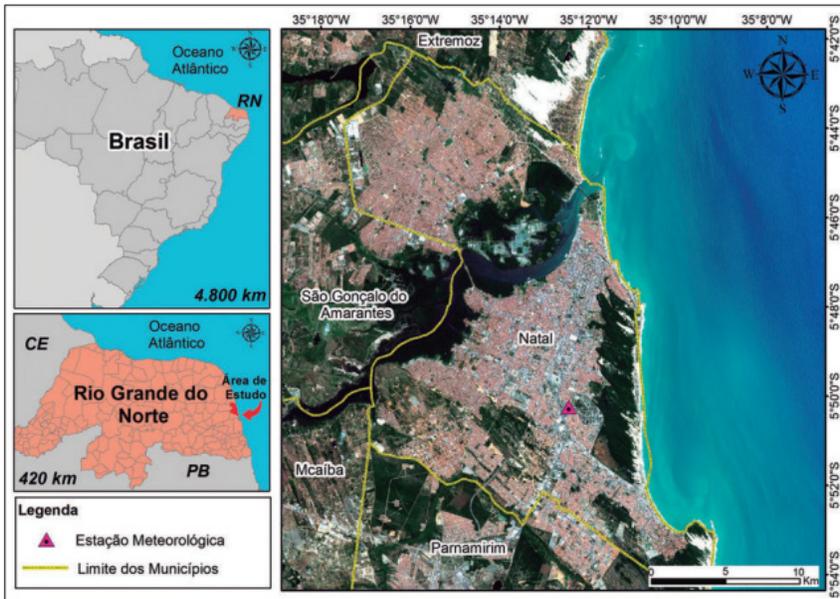


Figura 1: Mapa referente ao município de Natal, RN. Fonte: AMORIM, 2020.

2.2 Dados Utilizados

Foram coletados dados das variáveis Irradiância Global Horizontal (GHI, *Global Horizontal Irradiance*) e Irradiância Difusa Horizontal (DHI, *Diffuse Horizontal Irradiance*), propondo uma análise para o intervalo entre 2015 e 2020, seguindo o calendário juliano. As coordenadas de latitude e longitude citadas no tópico anterior serviram como ponto de coleta inserido no sistema *on-line* do *Solar Energy Services for Professionals*, o qual é um serviço disponibilizado pelo site Solar Radiation Data (SoDa). Foram coletadas as variáveis na unidade Wh/m². O SoDa fornece séries temporais de irradiações globais, diretas e difusas na superfície horizontal e irradiação direta no plano normal, para as condições climáticas reais, bem como para condições de céu claro. A plataforma disponibiliza como cobertura geográfica a Europa, África, Oceano Atlântico e Oriente Médio.

2.3 Análises Estatísticas

Na análise do banco de dados da pesquisa foram utilizados métodos estatísticos destinados a avaliar o grau de variação dos dados próximos à média. Contudo, utilizam-se medidas de dispersão, tais como: desvio médio, variância e desvio padrão. Além disso, os conjuntos de dados de média e mediana também são incluídos para representar o valor central do conjunto de dados total.

2.3.1 Média

A média é dada pela soma de todos os elementos que estão sendo considerados, dividido pelo número de elementos (n). É dada pela Eq. (1):

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Eq. 1}$$

2.3.2 Variância e Desvio Padrão

Variância e desvio padrão são medidas de dispersão de uma amostra, e segundo Gurgel (1958), servem para dar uma ideia o quão distante a amostra está da média. O desvio padrão amostral é dado pela Eq.(2) e a variância amostral é o resultado obtido pelo desvio padrão ao quadrado.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X - \bar{X})^2} \quad \text{Eq. 2}$$

2.3.3 Mediana

A mediana é uma medida de posição que separa o conjunto de dados ordenados exatamente na metade, deixando 50% dos valores abaixo e 50% acima.

2.3.4 Quartis

Em um trabalho recente, Morettin (2017) propôs que os quartis são medidas de posição que separam o conjunto de dados ordenados em 4 partes iguais. O primeiro quartil (Q1) indica o ponto de separação onde 25% da amostra está abaixo desse valor. O segundo quartil (Q2) é a mediana, com 50% acima e abaixo. Já o terceiro quartil (Q3), é o ponto onde 75% da amostra está abaixo de seu valor.

2.3.5 Boxplot

De acordo com Morettin (2017), o gráfico Boxplot ajuda a visualizar como se portam os dados em relação à simetria e dispersão. Na sua construção é considerado o eixo vertical (y, ordenadas) do gráfico o valor dos dados. Primeiro, é traçado um retângulo onde a parte superior é o Q3 e a inferior o Q1. Um traço indica a mediana (Q2). Em seguida, é criado uma linha do Q3 até o limite superior (valor máximo amostrado) e do Q1 até o limite inferior (valor mínimo). Os pontos discrepantes, chamados outliers, são valores que ficam abaixo do valor $Q1 - 1.5 * (Q3 - Q1)$ ou acima de $Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)$.

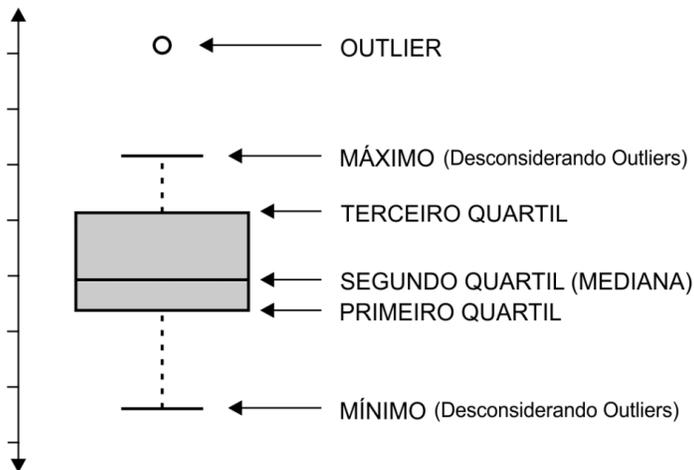


Figura 2 - Informações contidas no Boxplot. Fonte: Oper¹, 2021.

2.3.6 Regressão linear simples

A análise de regressão é considerada simples quando envolve duas variáveis: a variável dependente/resposta e a variável independente/explicativa. Para sua aplicação é necessário que os dados sejam oriundos de uma amostra aleatória. Como parte de avaliação da técnica se utiliza o gráfico de dispersão, o qual é utilizado para mostrar a relação entre as duas variáveis, podendo ela ser linear ou não (DRAPER, SMITH, 1998; KUTNER et al., 2004). Segundo Azevedo (2012), quando se tem apenas uma variável independente, o modelo de regressão linear é da forma:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

Y_i - variável resposta (dependente);

α - constante que representa a interceptação da reta com o eixo vertical;

X_i - variável independente;

β - parâmetro

3 | RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes às análises das séries de Irradiância Global Horizontal e Irradiância Difusa Horizontal (Wh/m²) para a cidade de Natal. Com auxílio da Fig. 3, são apresentadas as características do GHI para o município de Natal. Dessa forma, foi possível identificar a existência de uma tendência linear para a série, aplicando uma suavização de sua variabilidade, que ilustra o comportamento médio ao longo do tempo.

Através de uma análise visual da Fig. 3a observa-se a existência de uma sazonalidade muito bem marcada, ou seja, os dados mostram que há períodos com maiores incidências e outros com menores. Durante a observação notou-se que no mês de outubro foram registradas as maiores incidências, enquanto que no mês de junho as menores, sendo correspondentes a 220560 e 135481 Wh/m², respectivamente. Para melhor entender o comportamento do GHI, foi gerada uma linha azul (Fig. 3a, Atlas) para acompanhar a transição entre os meses. Quando a análise é voltada para o período chuvoso que ocorre entre os meses de março e maio, nota-se um período de transição dos maiores para os menores valores. Entretanto, para a transição inversa, ou seja, dos mínimos para os máximos, ocorre uma mudança abrupta no período seco, o qual decorre entre os meses de setembro e novembro.

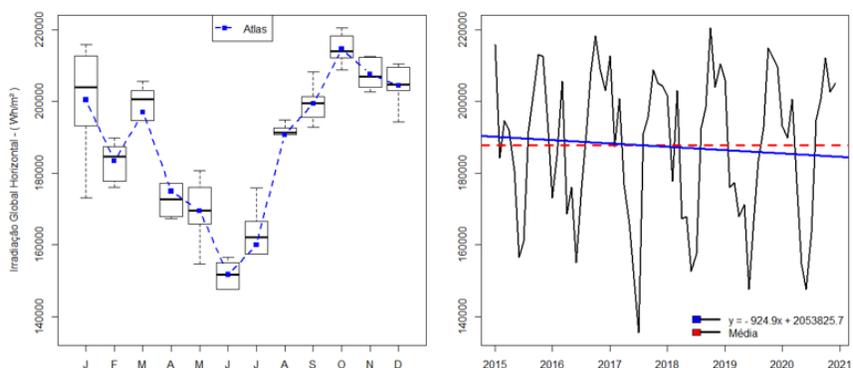


Figura 3 - Comportamento da Irradiação Global Horizontal (GHI): a) Gráfico com destaque ao boxplot referente ao comportamento do GHI dos 12 meses para um período de 5 anos. b) Gráfico referente com a série de 5 anos com destaque a regressão linear.

| ESTATÍSTICAS | RESULTADOS (Wh/m ²) |
|--------------|---------------------------------|
| Mínimo | 135481 |
| 1° Quartil | 172611 |
| Mediana | 192207 |
| Média | 187785 |
| 3° Quartil | 204513 |
| Máximo | 220560 |

Tabela 1 - Resultados do boxplot referente ao GHI.

| GHI | DIFERENÇA (%) |
|--------|---------------|
| Mínima | 21,7 |
| Média | 15,8 |
| Máxima | 9,8 |

Tabela 2 - Valores das diferenças entre o período do verão e inverno para o GHI

Na Fig. 3b foi aplicado um cálculo de regressão linear simples, a fim de verificar se os dados apresentavam algum tipo de tendência. Dessa forma, foi possível identificar a ocorrência de uma mudança mínima negativa em relação aos valores, e o ponto de alteração na tendência foi identificado no mês de julho no ano de 2017. Quando realizada a comparação entre o inverno e o verão austral, compreendidos entre os meses de junho e agosto e entre dezembro e fevereiro, respectivamente, é observado uma diferença com uma taxa de até 21,7% entre eles, como é possível observar para os mínimos valores (Linha 1, Tab. 2). A média para a análise do período completo ficou em torno de 187785 Wh/m² (Tab. 1).

Os dados de Irradiação Difusa Horizontal (Fig. 4a) apresentaram o seguinte comportamento, a sazonalidade assim como o da Fig. 3 manteve um comportamento bem definido em relação ao seu vale (menor valor da série) que ocorreu no mês de junho com o valor de 46494 Wh/m², mas quando observamos o pico (maior valor da série), observou-se a ocorrência em maio com 73421 Wh/m², mas com um adendo, os maiores valores foram observados no mês de janeiro. Quanto ao box plot é possível observar que eles apresentam uma maior dispersão de valores, principalmente entre janeiro e março. No período seco e chuvoso, onde acontecem as transições de máxima para mínima e de mínima para máxima nas observações, os boxplots apresentam as mínimas dispersões da série.

Sobre os valores encontrados nos métodos estatísticos, verificamos que a média ficou em torno de 59000 Wh/m² e que quando foi aplicado à análise de regressão linear não foi possível identificar nenhuma mudança na sua tendência seja ela positiva ou negativa (Fig. 4b), apesar de não apresentar tendência, a série mostra valores de diferença acima dos 14% e com o seu máximo chegando a 17,4% no valores mínimos quando comparamos os resultados apresentados entre o inverno e verão.

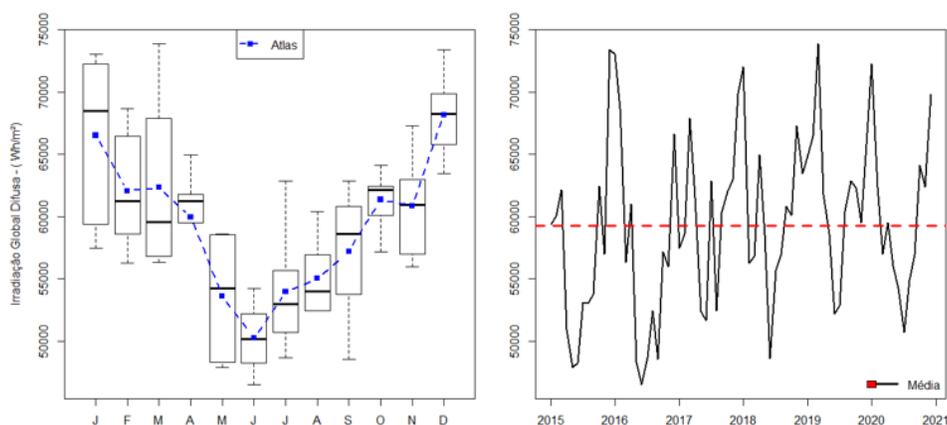


Figura 4 - Comportamento da Irradiação Difusa Horizontal (DHI): a) Gráfico com destaque ao boxplot referente ao comportamento do DHI dos 12 meses para um período de 5 anos. b) Gráfico referente com a série de 5 anos com destaque a regressão linear.

| ESTATÍSTICAS | RESULTADOS (Wh/m ²) |
|--------------|---------------------------------|
| Mínimo | 46944 |
| 1° Quartil | 54113 |
| Mediana | 59449 |
| Média | 59284 |
| 3° Quartil | 62921 |
| Máximo | 73918 |

Tabela 3 - Resultados do boxplot referente ao DHI

| GHI | DIFERENÇA (%) |
|--------|---------------|
| Mínima | 17,4 |
| Média | 19,1 |
| Máxima | 14,4 |

Tabela 4 - Valores das diferenças entre o período do verão e inverno para o DHI

4 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a caracterização e o comportamento para os dados de Irradiância Global Horizontal e Irradiância Difusa Horizontal para a cidade de Natal. Os resultados apresentados demonstram valores significativos quanto à comparação do período do inverno e verão, com diferenças de até 21,7 % para o GHI e 19,1% para o DHI. Outro ponto destacável é a presença de uma tendência negativa para o GHI e a completa ausência de tendência no que se refere ao DHI. Porém, para determinar o que ocasionou isso, é necessário pesquisas adicionais para determinar a causa desses comportamentos. Esses estudos são complexos devido ao grande número de combinações de fatores envolvidos. Propõe-se que, em trabalhos futuros, sejam aplicados métodos mais robustos para testes de tendências, além de pesquisas de cunho meteorológico para complementar os resultados que venham ser obtidos.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMORIM, Ana Cleide Bezerra, et al. Variabilidade dos extremos de precipitação diária na cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. 2019.

AZEVEDO, P,R,M, Modelos De Regressão Linear, 3ª EDIÇÃO, NATAL: DUFRN, 2012, 13:6P.

Chen, S., & Chen, B. (2016). Urban energy–water nexus: a network perspective. *Applied Energy*, 184, 905-914.

De Oliveira, J. F. G., & Trindade, T. C. G. (2018). Sustainability performance evaluation of renewable energy sources: The case of Brazil. Springer International Publishing.

DRAPER, N. R., SMITH, H. Applied Regression Analysis. 3ª edição. Wiley Series in Probability and Statistics, 1998.

Gurgel, J. T. A., Frederico Pimentel Gomes, and A. P. Trivelin. "Determinação da epen aritmética e desvio padrão de quocientes de epend ependents s e ependents."

Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz 14(1958): 31-42.

Hoff, H. (2011). Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Conference.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Portal cidades: Mapa do estado do Rio Grande do Norte com destaque para o município de Natal. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/natal/panorama>> Acesso em: 12 Dez 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. 2021.

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J.; LI, W. Applied Linear Statistical Models. 5 ed. McGraw-Hill Irwin. 2004.

Morettin, P. A., BUSSAB, W. O, 2017. Estatística básica. Editora Saraiva.

OPER. Como interpretar um boxplot. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-um-boxplot/>>. Acesso em: 12 de nov. de 2021.

Pereira, Enio Bueno, et al., 2006. Atlas brasileiro de energia solar. Vol. 1. São José dos Campos: Inpe, 2006.

R Development Core Team (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <<http://www.R-project.org>>.

SODA - Solar Radiation Data. Disponível em: <<http://www.soda-pro.com/home>> Acesso em: 10 Dez 2021.

Varela, Gustavo Hellstrom, 2007. "Medição e Avaliação dos dados Solarimétricos." Seminário Estudantil de Produção Acadêmica 10.1 (2007).

Wonnacott, T. H. and Wonnacott, R. J. (1990). Introductory statistics, 5th edn, Wiley New York.