

## RELAÇÃO DO NDVI E EVI COM OS ÍNDICES CLIMÁTICOS DO NORDESTE DO BRASIL

Eliton Sancler Gomes **Sales**<sup>1</sup>, Fabiano da Silva **Araújo**<sup>2</sup>, Wendy Kaori **Matsunaga**<sup>3</sup>, José Ivaldo Barbosa de **Brito**<sup>4</sup>

(1 – Universidade Federal de Campina Grande, [elitonsancler@hotmail.com](mailto:elitonsancler@hotmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2022-6528>; 2 – Universidade Federal de Campina Grande, [fabiano\\_engenharia@hotmail.com](mailto:fabiano_engenharia@hotmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-1397-6312>; 3 – Universidade Federal de Campina Grande, [wendy.kaori@estudante.ufcg.edu.br](mailto:wendy.kaori@estudante.ufcg.edu.br), <https://orcid.org/0000-0002-6778-5450>; 4 – Universidade Federal de Campina Grande, [jivaldobrito@gmail.com](mailto:jivaldobrito@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1845-935X>)

**Resumo:** O Nordeste do Brasil é caracterizado por um clima semiárido com altas temperaturas e baixos índices pluviométricos. Essas condições climáticas associadas às ações antrópicas como o desmatamento, uso e ocupação do solo na região têm impactos significativos levando à degradação ambiental, perda de biodiversidade e aumentando a vulnerabilidade de índices climáticos extremos, que devem ser analisados. Porém para estudar o clima e realizar análises com o comportamento do uso e cobertura do solo, é necessário dados como distribuição espacial que contemple as características físicas e climáticas da região e com observações contínuas, que do ponto de vista de estações meteorológicas ainda não é plenamente observado no Nordeste do Brasil, mas isto pode ser suprido usando dados de reanálise desde que sejam validados. Neste contexto, este trabalho tem como objetivos: validar os dados de reanálises do ERA5-Land e CPC/NOAA com dados de estações meteorológicas; obter os índices de aridez e o do déficit de umidade da atmosfera proposto por Thornthwaite (1948) e de aridez do UNEP (IaUNEP), usando dados de reanálise; investigar se os índices de vegetação podem ser usados como variáveis adicionais a classificação climática da Região. Para a validação dos dados de reanálise a metodologia empregada foi a análise dos índices estatísticos: erro médio percentual, erro médio absoluto e padrão de estimativa, raiz do erro quadrático médio e coeficiente de correlação, sendo os dados de referência os observados em estações e os de reanálise a serem testados. Para a

determinação dos índices climáticos de Thornthwaite usou-se a metodologia do balanço hídrico de Thornthwaite e Matter (1955), enquanto, para o IAUNEP utilizou-se a razão entre precipitação observada ou da reanálise e a evapotranspiração de referência obtida pelo método Penman-Montheith-FAO, para os índices de vegetação empregou-se as equações de NDVI e EVI. Como resultado, observou-se que os dados da reanálise ERA5-Land representam muito bem os observados, exceto a precipitação, por este motivo, recorreu-se aos dados de precipitação do CPC/NOAA, que foram validados com sucesso. As configurações espaciais dos índices climáticos obtidas com a reanálise apresentaram-se de acordo com as características físicas e climáticas da Região, e os padrões espaciais dos índices de vegetação, de um modo geral, acompanharam a classificação do clima regional. Conclui-se que os dados de reanálise do ERA5-Land, exceto a precipitação e da precipitação do CPC/NOAA são confiáveis e podem ser usados em estudos climáticos, enquanto os índices de vegetação podem ser utilizados como variáveis adicionais na classificação climática no Nordeste.

**Palavras-chave:** Reanálise; Clima; Semiárido

## **RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATE INDICES AND NDVI AND EVI IN THE NORTHEAST OF BRAZIL**

**Abstract:** The Northeast of Brazil is characterized by a semi-arid climate with high temperatures and low rainfall rates. These climatic conditions associated with anthropic actions such as deforestation and land use and occupation have caused significant impacts, leading to environmental degradation, loss of biodiversity and higher vulnerability to extreme climate indices, which need to be analyzed. The study of the climate and behavior of land use and cover requires data such as spatial distribution covering the physical and climatic characteristics of the region and with continuous observations. From the point of view of weather stations, such data are not observed in the Northeast of Brazil, but they can be obtained from reanalysis data, provided they are validated. In this context, this work aims to: validate ERA5-Land and CPC/NOAA reanalysis data with weather station data; obtain the aridity and atmospheric moisture deficit indices proposed by Thornthwaite (1948) and the aridity index of UNEP (AIUNEP) using reanalysis data; investigate whether vegetation indices can be used as additional variables for the classification of the climate of the region. The methodology used to validate reanalysis data was the analysis of statistical indices: mean percentage error, mean

absolute error, and standard error of the estimate, root mean square error and correlation coefficient, with observed weather station data being the reference data, and the reanalysis data being the data to be tested. Thornthwaite and Matter's (1955) water balance methodology was used to determine Thornthwaite's climatic indices; the ratio of observed or reanalysis precipitation to reference evapotranspiration obtained by the Penman-Montheith-FAO method was used for the AIUNEP; and NDVI and EVI equations were used for vegetation indices. In the results, ERA5-Land reanalysis data represented very well the observed data, except for precipitation; thus, CPC/NOAA precipitation data were used, which were successfully validated. The spatial configurations of the climatic indices obtained with reanalysis data were in accordance with the physical and climatic characteristics of the region, and the spatial patterns of the vegetation indices, in general, followed the classification of the regional climate. It is concluded that ERA5-Land reanalysis data, except for precipitation, and CPC/NOAA precipitation data are reliable and can be used in climate studies, and vegetation indices can be used as additional variables in climate classification in the Northeast of Brazil.

**Keywords:** Reanalysis; Climate; semi-arid

## **RELACIÓN ENTRE EL NDVI Y EL EVI CON LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS EN EL NORESTE DE BRASIL**

**Resumen:** El Noreste de Brasil se caracteriza por un clima semiárido con altas temperaturas y escasas precipitaciones. Estas condiciones climáticas asociadas a acciones antrópicas como la deforestación, el uso y ocupación del suelo en la región tienen impactos significativos que conducen a la degradación ambiental, pérdida de biodiversidad y aumento de la vulnerabilidad a índices climáticos extremos, los cuales deben ser analizados. Sin embargo, para estudiar el clima y realizar análisis con el comportamiento de uso y cobertura del suelo, son necesarios datos como la distribución espacial que incluya las características físicas y climáticas de la región y con observaciones continuas, que desde el punto de vista de las estaciones meteorológicas no se observa en el Noreste de Brasil; pero esto se puede proporcionar utilizando datos de reanálisis siempre que estén validados. En este contexto, este trabajo tuvo como objetivos: validar los datos de reanálisis de ERA5-Land y CPC/NOAA con datos de estaciones meteorológicas; obtener los índices de aridez y déficit de humedad atmosférica propuestos por Thornthwaite (1948) y el índice de aridez del UNEP (IaUNEP), utilizando datos

de reanálisis; investigar si los índices de vegetación pueden usarse como variables adicionales para la clasificación climática de la región. Para validar los datos del reanálisis, la metodología utilizada fue el análisis de índices estadísticos: error porcentual medio, error absoluto medio y error estándar de estimación, raíz del error cuadrático medio y coeficiente de correlación, siendo los datos de referencia los observados en las estaciones y los datos a ser sometidos a prueba los datos de reanálisis. Para determinar los índices climáticos de Thornthwaite se utilizó la metodología de balance hídrico de Thornthwaite y Matter (1955), mientras que para el IaUNEP se utilizó la relación entre la precipitación observada o reanálisis y la evapotranspiración de referencia obtenida por el método de Penman-Montheith-FAO, y para los índices de vegetación se utilizaron las ecuaciones NDVI y EVI. Como resultado, se observó que los datos del reanálisis ERA5-Land representan muy bien los observados, excepto la precipitación, por lo que se utilizaron los datos de precipitación de CPC/NOAA, los cuales fueron validados exitosamente. Las configuraciones espaciales de los índices climáticos obtenidos con el reanálisis estuvieron de acuerdo con las características físicas y climáticas de la Región, y los patrones espaciales de los índices de vegetación, en general, siguieron la clasificación del clima regional. Se concluye que los datos de reanálisis de ERA5-Land, excepto la precipitación, y la precipitación de CPC/NOAA son confiables y pueden usarse en estudios climáticos, mientras que los índices de vegetación pueden usarse como variables adicionales para el uso en la clasificación climática del Noreste de Brasil.

**Palabras clave:** Reanálisis; Clima; Semi árido

## 1. Introdução

O clima é um dos elementos importantes na formação da vegetação de uma região, pois de certa forma o clima controla a distribuição da vegetação, porém, a vegetação também exerce influência sobre os tipos de clima de um dado local. Neste sentido, Fang et al. (2002) descrevem que a relação entre clima e vegetação é evidenciada pela coincidência entre zonas climáticas e biomas. Entretanto, ressalta-se que se observa algum grau de sobreposição entre os tipos de clima e as áreas de vegetação. Esta sobreposição clima/vegetação, descrita por Fang et al., 2002, também é observada em grande parte do Nordeste do Brasil (NEB) cujo tipo climático dominante, principalmente na parte central, é o semiárido e a vegetação é a caatinga; na costa leste observa-se clima úmido e a vegetação nativa é Mata Atlântica, enquanto, no noroeste do

NEB também é observado clima úmido e a vegetação presente é típica da Floresta Amazônica. Também é possível verificar sobreposições de Caatinga, Mata Atlântica, Cerrado e Floresta Amazônica.

Por outro lado, nas delimitações dos tipos de clima de uma determinada região, em geral, tem-se uma incerteza na posição geográfica na linha de separação de dois tipos de clima. Isto tem sido verificado na delimitação do Semiárido realizado pela SUDENE – Superintendência do desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2021). Ressalta-se que uma das dificuldades na determinação do clima de um local decore da ausência de variáveis meteorológicas necessárias para a obtenção de índices climáticos. Isto, de certa forma, é observado no NEB, pois a região apresenta uma densidade espacial de postos pluviométricos, que corresponde à recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO, 1981 e WMO, 2008), porém com relação à distribuição espacial de estações meteorológicas, em muitos estados, ainda não se tem uma boa densidade de estações, ou seja, no Nordeste observa-se uma excelente distribuição de observações rotineiras e confiáveis de precipitação, mas para as demais variáveis meteorológicas ainda se faz necessário aumento da densidade espacial e observações contínuas, além disso, nas estações existem ainda períodos observados com ausência de dados, o que dificulta a obtenção de dados precisos e em tempo real para o monitoramento das mudanças climáticas mais efetivas (Ribeiro Neto et al., 2020; Souza et al., 2020; Silva et al., 2021; Santos et al., 2022).

Diante desta problemática, fontes alternativas de dados meteorológicos têm se tornado cada vez mais comum, e uma das principais ferramentas para esse tipo de estudo em longo prazo e de monitoramento contínuo são os dados de reanálises de modelos atmosféricos globais, como, por exemplo, o ERA5-Land, a quinta geração de reanálise do European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) e do projeto CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation do Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration CPC/NOAA. Esses dados são gerados por modelos numéricos que utilizam informações de diversas fontes, como satélites e estações meteorológicas, para reconstruir as condições climáticas passadas e presentes. Vários estudos já exploraram o seu potencial. (Gleixner et al., 2020; Longo-Minnolo et al., 2020; Vanella et al., 2020; Paredes et al., 2020; Schumacher et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021; Wang et al., 2021; McNicholl et al., 2021; Wu et al., 2022). Ressalta-se que na presente pesquisa antes do uso dos dados de

reanálise será realizada uma validação, com o objetivo de verificar se os mesmos seguem a climatologia e as variabilidades intrasazonal, sazonal e interanual do NEB.

Além da relativamente baixa densidade de estações meteorológica, no NEB, as ações antrópicas como desmatamento, expansão agrícola e urbana e modificações no uso do solo, associadas aos extensos períodos secos, clima árido, semiárido e as dificuldades de gestão dos recursos hídricos têm contribuído para alterações no clima e intensificado as mudanças climáticas na região, tornando-a ainda mais árida e sujeita a eventos extremos, como secas e enchentes (Dantas et al., 2020; Silva et al., 2020; Rocha et al., 2021) e contribuído com sua alta vulnerabilidade social e baixos índices de desenvolvimento humano (Aragão et al., 2018; Feindouno et al., 2020). Ressalta-se que uma das ferramentas para estudo dos efeitos das ações são as análises das variações do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) e do índice de vegetação melhorado (EVI – enhanced vegetation index) que são indicadores de produtividade e saúde da vegetação, e consequentemente tendo como um de seus efeitos correspondentes à influência na alteração de cada tipo de clima da região do Nordeste (Domingues et al., 2019).

Tendo em vista as condições climáticas do NEB e as alterações do uso e cobertura do solo, faz-se necessário o monitoramento por meio de índices climáticos e sua relação com o comportamento do NDVI e EVI para cada tipo de clima obtido. Essa análise é importante, pois os índices NDVI e EVI são capazes de expressar as condições atuais da vegetação de acordo com o clima. Desta maneira é possível desenvolver um sistema de monitoramento das características da vegetação e conhecer sua semelhança com as condições climáticas de uma determinada área (Wang et al., 2020; Jiang et al., 2020; Zhang et al., 2021; Zhu et al., 2021; Xu et al., 2022). Portanto, é oportuno pesquisar se realmente é fundamental o uso de dados da reanálise ERA5-Land do ECMWF e do projeto CPC/NOAA, bem como de NDVI e EVI para a análise das condições, monitoramento e classificação do clima do NEB.

Deste modo, este trabalho tem como objetivos validar os dados de reanálises do ERA5-Land e CPC/NOAA com dados de estações meteorológicas para realização de estudos climáticos da região do Nordeste do Brasil, bem como obter o índice de aridez e o déficit de umidade da atmosfera, aqui denominado de déficit hídrico, proposto por Thornthwaite (1948) e o aridez do UNEP ( $I_{aUNEP}$ ), utilizar os dados de reanálise validados e verificar se as configurações espaciais obtidas realmente são condizentes com as características ambientais do NEB, e investigar o comportamento da vegetação para cada tipo de clima da região.

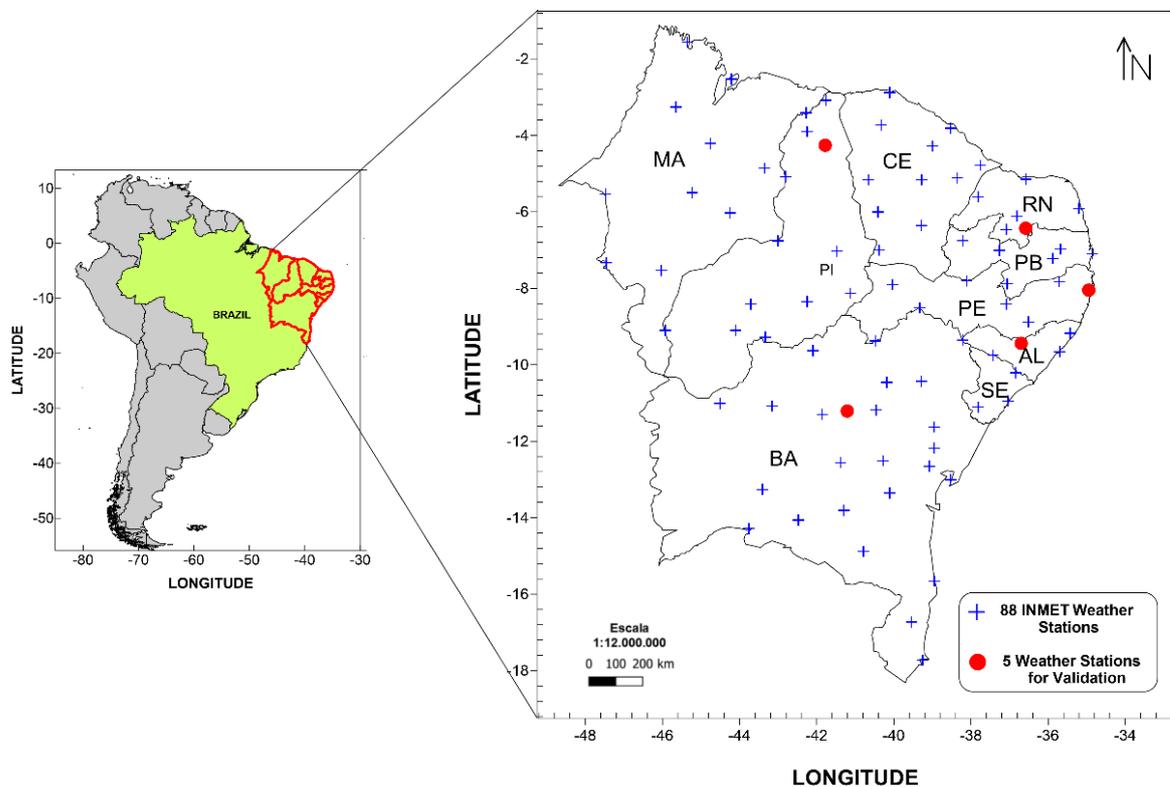
## 2. Materiais e Métodos

O trabalho é dividido nas seguintes etapas: definição da área de estudo, obtenção dos dados, validação com análises estatísticas, classificação climática de toda a área de estudo com a utilização dos dados de reanálises ERA5-Land e reanálises atmosféricas do Precipitation do Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC/NOAA) e por último o cálculo do NDVI e EVI, obtidos através de imagens orbitais do satélite TM - Landsat 7 para analisar seu comportamento com o tipo de clima na região.

### 2.1 Área de Estudo

No trabalho a área de estudo é o NEB, que abrangem os estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Para realização da validação dos dados de reanálises, foi feito um levantamento de 88 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) distribuídas no NEB, com registro de dados horários entre 1981-2019.

**Figura 1.** Mapa das estações meteorológicas do INMET utilizadas para validação. (MA – Maranhão, PI – Piauí, CE – Ceará, RN – Rio Grande do Norte, PB – Paraíba, BA – Bahia, AL – Alagoas, SE – Sergipe, PE – Pernambuco).



Analisadas uma a uma, de todas as 88 estações do INMET, foi possível utilizar os dados de apenas cinco, pois foram às estações dentre as 88 que apresentou o maior período de dados com o menor número de falhas possível para que fosse utilizadas na validação do dados de reanálises, destacado os seguintes municípios, Cruzeta – RN (6,43°S, 36,79°W, 226m), Palmeira dos Índios – AL (9,42°S, 36,62°W, 278m), Piripiri- PI (4,28°S, 41,79°W, 158m), Morro do Chapéu – BA (11,55°S, 41,15°W, 1002m) e Recife – PE (8,06°S, 34,96°W, 7m), cuja distribuição espacial é mostrada na Figura. 1 destacadas em ponto vermelho. As demais estações apresentaram um grande número de falhas, compreendendo um banco de dados com períodos mais curtos, variando entre 8 e 12 anos sem falhas, sendo que poderiam comprometer a validação dos dados de reanálise. Portanto, foram escolhidas as que apresentaram o maior período de dados 2000-2016 com o menor número de falhas possível, e assim definido o período de estudo do trabalho 2000-2016 para validação, obtenção e avaliação dos índices climáticos e análise do NDVI e EVI médio.

É salutar informar que estas 88 estações foram utilizadas pelo INMET para produzir as normais climatológicas do Brasil no período de 1991 a 2020. Contudo, nem todas as estações continham todas as variáveis, por exemplo, para a temperatura média compensada é possível observar, na planilha disponibilizada pelo INMET, que em apenas 31 estações foi possível produzir as normais climatológicas para todos os meses do ano, as demais tinham dados ausentes (INMET, 2022). Também é oportuno descrever que na presente pesquisa foram realizadas validações de dados das reanálises para outras estações, como por exemplo, Quixeramobim, no Sertão Central do Ceará, e Vitória da Conquista, no sul da Bahia, porém para outros períodos diferentes de 2000 a 2016. Ressalta-se que os dados das estações foram utilizados para revalidação das reanálises, que uma vez revalidados foram usados para os cálculos dos índices de aridez e do déficit hídrico em uma grade de 0,5° x 0,5°, que corresponde a 505 pontos de grade para todo Nordeste.

## 2.2 Dados

Das estações meteorológicas do INMET, foram utilizados dados diários de precipitação (mm), insolação total (horas) e temperaturas mínima (°C) e máxima (°C), bem como dados dos horários sinóticos, e a partir deles feito a média diária, de temperatura (°C), umidade relativa (%) e intensidade do vento (m/s). Da reanálise ERA5-Land para o mesmo período citado anteriormente, foram utilizados dados de temperaturas do ar (°C), temperatura do ponto de

orvalho (°C), saldo de radiação solar na superfície ( $J/m^2$ ), saldo de radiação de ondas longas superfície ( $J/m^2$ ), intensidade do vento (m/s) e precipitação pluvial, com resolução espacial de  $0,1 \times 0,1$  graus. Dados de precipitação pluvial do CPC/NOAA, com resolução de  $0,5 \times 0,5$  graus (Chen et al., 2008).

Na validação dos dados de reanálise, o primeiro passo foi verificar se os dados apresentavam o mesmo comportamento sazonal ao longo do ano dos dados observados em estações. Observou-se, que do conjunto de variáveis analisadas do ERA5-Land, a única que não apresentou o comportamento sazonal próximo ou até mesmo igual ao dos dados de estação foi à precipitação. Ressalta-se que a curva sazonal ao longo do ano da precipitação da reanálise ERA5-Land até foi semelhante à dos dados de estações, porém as precipitações do período mais chuvoso do semiárido do NEB estavam subestimadas quando comparado com dados observados nas estações. Portanto, tornou-se necessário buscar outra fonte de dados de reanálise de precipitação e optou-se pelo projeto de precipitação CPC/NOAA, que conseguiu captar as variabilidades intrasazonal, sazonal e interanual da precipitação do semiárido e apresentar fortes correlações com os dados observados em estação, como mostrado na seção 3.1 Validação dos dados da reanálise ERA5-Land e CPC/NOAA.

Os dados de velocidade de vento dos produtos de reanálise do ERA5-Land, próximo da superfície da Terra, estão disponíveis a 10m do solo. Logo, foram convertidos para 2m conforme equação proposta em Allen et al. (1998).

Foram calculadas médias climatológicas para todas as variáveis das três distintas fontes com o período 2000-2016, que foi o período com dados disponíveis necessários para validação. Para os cálculos foi utilizado o Microsoft Excel 2019 e a linguagem de programação Python. Como os dados do ERA5-Land possui uma resolução em pontos de grades de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  e os do CPC/NOAA  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , através da linguagem de programação Python 3.8, na manipulação dos dados de reanálises, foram obtidos valores médios variando a latitude e longitude em  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , compreendendo todo o território da área de estudo. Com isso, foi gerado um total de 505 pontos de grades, que representa 5,74 vezes o número de estações do INMET. A partir dos dados de cada ponto, foi realizada a climatologia no período de estudo citado e posteriormente o cálculo da classificação climática com o período disponível.

Ressalta-se que Xavier et al. (2022) realizaram um profícuo trabalho de reanálise da temperatura do ar máxima e mínima, precipitação, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento a 2 m de altura, sobre todo território do Brasil, para o período de 1961 a 2020 e grade

de 0,1° x 0,1°. Entretanto, as reanálise do ERA5-Land e do CPC são atualizada em tempo quase real, enquanto, as de Xavier et al. (2022) não são atualizadas rotineiramente. Portanto, o uso das reanálises do ERA5-Land e CPC são muito úteis em estudos ambientais sobre o território do Brasil.

### 2.3 Dados e Cálculos de NDVI e EVI

Foi utilizada imagens orbitais do satélite Landsat 7, gerenciado e operado em conjunto pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) e pelo US Geological Survey (USGS), onde fornece o registro mais longo e contínuo de observações da superfície terrestre da Terra gratuitamente em resolução média desde 1972. O Landsat 7 possui sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) lançado em 15 de abril de 1999 e está em operação há mais de 20 anos com o desenvolvimento recente da análise de séries temporais com base em todas as observações claras disponíveis de valor similar de outros Landsats (Wulder et al., 2019; Zhu et al., 2019).

Para os cálculos dos índices de vegetação NDVI e EVI foram necessárias baixar imagens de reflectância na banda próxima ao infravermelho (NIR), na banda vermelha (RED) e a reflectância na banda azul (BLUE). Para a obtenção das configurações espaciais do NDVI e EVI médios do período 01 de janeiro 2000 a 31 de dezembro de 2016 foram utilizadas 4989 e 7003 imagens, respectivamente, ambas com resolução de 30m e em seguida realizada a média para análise da variação espacial e temporal.

As imagens foram processadas por meio do Google Earth Engine - GEE, que incluiu correções atmosféricas com cobertura de nuvens de até 20% e recorte da área de estudo. Os valores de NDVI e EVI foram armazenados em arquivos raster GeoTIFF e processado os mapas no Software gratuito e de código aberto QGIS 3.16.9.

Para os cálculos de NDVI e EVI foram utilizadas as equações conforme descritas por QIU et al., (2021).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad 1.0 \quad EVI = 2,5 * \left( \frac{NIR-RED}{NIR+6*RED-7,5*BLUE+1} \right) \quad 2.0$$

onde NIR é a reflectância na banda próxima ao infravermelho, RED é a reflectância na banda vermelha e BLUE é a reflectância na banda azul.

## 2.4 Validação dos dados da reanálise

Para a análise dos resultados e verificar se é confiável utilizar os dados de reanálises em classificação climática, utilizou-se o Erro Médio Percentual - EMP, o Erro médio absoluto - EMA, raiz do erro quadrático médio (REQM) e o erro padrão de estimativa (EPE), o coeficiente de correlação (r). Foram validados dados de temperatura, precipitação e velocidade do vento, cujas equações são apresentadas a seguir.

$$EMP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{pi} - X_{oi}}{X_o} \right| \quad 3.0 \quad EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_{pi} - X_{oi}] \quad 4.0$$

$$REQM = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - X_{oi})^2}{N} \right)^{1/2} \quad 5.0 \quad EPE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_{pi} - X_{oi})^2}{N-1}} \quad 6.0$$

$$r = \frac{cov(X_{pi}, X_{oi})}{\sqrt{var(X_{pi}) \cdot var(X_{oi})}} \quad 7.0$$

onde  $X_{pi}$  corresponde ao valor estimado (CPC/NOAA para variável precipitação e da reanálises ERA5-Land para as demais variáveis),  $X_{oi}$  ao valor observado (estação) de um dia ao longo da série de dados para precipitação e temperatura e das observações para o vento, N a quantidade de dias da série ou o número de observações conforme a variável,  $cov(X_{pi}, X_{oi})$  covariância das variáveis  $X_{pi}$  e  $X_{oi}$ ,  $var(X_{pi})$  e  $var(X_{oi})$  são as variâncias das variáveis  $X_{pi}$  e  $X_{oi}$ .

É importante mencionar que as métricas EMP, EMA, REQM e EPE são utilizadas para medir se os dados de reanálise não subestimam ou superestimam os dados observados em estação, bem como verificar a acurácia dos dados de reanálise, ou seja, quão próximos estão os dados da reanálise e observados. Enquanto, o coeficiente de correlação, uma vez removido o ciclo anual da série de dados, é uma medida da capacidade dos dados de reanálise em captar as variabilidades intrasazonal e interanual contidas nos dados observados em estação.

## 2.5 Estimativa da Evapotranspiração de Referência - $ET_0$

Na determinação do índice de aridez e do déficit hídrico proposto por Thornthwaite (1948) obtido por meio do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), bem no cálculo do índice de aridez do UNEP as variáveis de entradas são a precipitação e a evapotranspiração potencial ou evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Portanto, após a validação dos dados da reanálise do ERA5-Land foi estimada a  $ET_0$  em uma grade de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , com a utilização do

modelo completo de Penman-Monteith-FAO, que necessita de uma gama de variáveis meteorológicas como mostrado por Allen et al. (1998). Ressalta-se que a  $ET_0$  Penman-Monteith-FAO é recomendada pela FAO tanto para uso em agrometeorologia como para a obtenção dos índices climáticos. A partir da  $ET_0$  estimada para uma grade de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , elaborou-se a média aritmética espacial para uma grade de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ .

## 2.6 Índices Climáticos

Após as estimativas de  $ET_0$  foram calculados os índices climáticos de Aridez ( $I_a$ ) proposto por Thornthwaite (1948), o déficit de umidade da atmosfera de Thornthwaite (DEF), já denominado anteriormente de déficit hídrico e o  $I_{aUNEP}$  (Middleton & Thomas, 1992; Middleton & Thomas, 1997). Estes índices foram calculados por meio do Balanço Hídrico seriado segundo o modelo proposto por Thornthwaite & Mather (1955) e desenvolvido em planilha Microsoft Excel por Rolim et al., (1998). O  $I_a$  quantifica o grau de aridez de uma determina região e é um índice muito versátil, pois além de indicar a aridez das terras secas, também é capaz de advertir sobre possíveis períodos de aridez, longo do ano, das terras úmidas, também é um índice auxiliar nas classificações climáticas de uma dada região. O DEF determina o déficit de umidade anual da atmosfera de uma região e também é uma medida auxiliar em classificação climática.  $I_{aUNEP}$  é um índice de aridez recomentado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente para a classificação climática de terras secas.

Para calcular o Índice de Aridez no período de 2000 a 2016, foi utilizada a fórmula preparada por Thornthwaite (1948):

$$I_a = (DEF_{anual}/ET_0) \times 100 \quad (8.0)$$

em que  $I_a$  é o índice de aridez de Thorntwaite;  $DEF_{anual}$  é o déficit hídrico total anual;  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência total anual.

O  $I_a$  pode variar de zero, na ausência de déficit de água, a 100, quando a deficiência é igual à evapotranspiração de referência. O  $I_a$  é uma medida do grau de aridez que determinada área experimenta ao longo do ano. De acordo com Oliver (1978) quanto maior for o grau de aridez de uma localidade, mais tempo ao longo do ano ela se encontrará em condições de secura. Valores de  $I_a$  inferiores a 17, significam pequeno ou nenhum déficit de água; entre 17 e 33, déficit moderado e, superior a 33, déficit muito forte (Oliver, 1978).

Para realizar o cálculo do índice de aridez do UNEP para o período de 2000 a 2016, foi utilizada a forma recomendada pelo UNEP (1992):

$$I_{aUNEP} = PRP_{total} / ET_0 \quad (9.0)$$

em que  $I_{aUNEP}$  é o índice de aridez do UNEP;  $PRP_{total}$  é a precipitação média total anual;  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência média total anual.

Na Tabela 1 é mostrada as classes climáticas de acordo com os valores limites do  $I_{aUNEP}$ . Ressalta-se, que esse índice tem sido utilizado com medidor das áreas sujeitas aos processos de desertificação, segundo a definição das Nações Unidas.

**Tabela 1.** Classificação Climática de acordo com o  $I_{aUNEP}$ .

| Índice de Aridez             | Classes Climáticas |
|------------------------------|--------------------|
| $I_{aUNEP} \leq 0,05$        | Hiperárido         |
| $0,05 < I_{aUNEP} \leq 0,20$ | Árido              |
| $0,20 < I_{aUNEP} \leq 0,50$ | Semiárido          |
| $0,50 < I_{aUNEP} \leq 0,65$ | Subúmido Seco      |
| $0,65 < I_{aUNEP} < 1,00$    | Subúmido Úmido     |
| $I_{aUNEP} \geq 1,00$        | Úmido              |

**Fonte:** Adaptado de Middleton & Thomas (1992).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Validação dos dados da reanálise ERA5-Land e CPC/NOAA

Foram analisados os parâmetros estatísticos para as anomalias de precipitação, temperatura e velocidade do vento para as cinco estações meteorológicas do INMET que apresentaram o menor número de falhas no período de 2000 a 2016.

Conforme mostrado na Tabela 2, dentre as três variáveis analisadas estatisticamente, a que apresentou maiores valores MAE, REQM e SES foi à precipitação do CPC/NOAA, justamente por que entre as variáveis analisadas a que apresenta as maiores variabilidade intersazonal e interanual é precipitação, porém, pode-se observar que apresentou uma boa correlação para todos os municípios, com valores  $r \geq 0,95$ , podendo ser utilizada na ausência de dados. O MAPE não foi calculado para a precipitação, pois em alguns meses não houve registro de precipitação e para seu cálculo não existe divisão por zero.

**Tabela 2.** Parâmetros estatísticos para precipitação, temperatura e velocidade do vento.

| <b>Precipitação</b>      |                         |                     |                          |                         |          |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|----------|
| <b>Localidade</b>        | <b>MAE<br/>(mm/mês)</b> | <b>MAPE<br/>(%)</b> | <b>REQM<br/>(mm/mês)</b> | <b>SES<br/>(mm/mês)</b> | <b>r</b> |
| Piripiri - PI            | 11,557                  | -                   | 18,262                   | 18,824                  | 0,994    |
| Cruzeta - RN             | 9,335                   | -                   | 15,602                   | 16,082                  | 0,975    |
| Recife - PE              | 26,70                   | -                   | 37,180                   | 38,324                  | 0,977    |
| Palmeira dos Índios - AL | 10,833                  | -                   | 16,771                   | 17,287                  | 0,948    |
| Morro do Chapéu - BA     | 8,320                   | -                   | 12,985                   | 13,384                  | 0,950    |
| <b>Temperatura</b>       |                         |                     |                          |                         |          |
| <b>Localidade</b>        | <b>MAE<br/>(°C)</b>     | <b>MAPE<br/>(%)</b> | <b>REQM<br/>(°C)</b>     | <b>SES<br/>(°C)</b>     | <b>r</b> |
| Piripiri - PI            | 1,117                   | 3,979               | 1,250                    | 1,289                   | 0,962    |
| Cruzeta - RN             | 0,555                   | 2,026               | 0,657                    | 0,677                   | 0,907    |
| Recife - PE              | 0,72                    | 2,760               | 0,788                    | 0,812                   | 0,933    |
| Palmeira dos Índios - AL | 1,076                   | 4,316               | 1,132                    | 1,167                   | 0,975    |
| Morro do Chapéu - BA     | 0,471                   | 2,260               | 0,564                    | 0,582                   | 0,978    |
| <b>Vento</b>             |                         |                     |                          |                         |          |
| <b>Localidade</b>        | <b>MAE<br/>(m/s)</b>    | <b>MAPE<br/>(%)</b> | <b>REQM<br/>(m/s)</b>    | <b>SES<br/>(m/s)</b>    | <b>r</b> |
| Piripiri - PI            | 0,482                   | 34,615              | 0,550                    | 0,567                   | 0,723    |
| Cruzeta - RN             | 0,362                   | 13,080              | 0,435                    | 0,448                   | 0,898    |
| Recife - PE              | 1,277                   | 86,898              | 1,336                    | 1,378                   | 0,404    |
| Palmeira dos Índios - AL | 0,515                   | 24,185              | 0,584                    | 0,602                   | 0,854    |
| Morro do Chapéu - BA     | 0,266                   | 11,036              | 0,338                    | 0,348                   | 0,941    |

Ressalta-se que outros pesquisadores compararam os dados de precipitação do projeto CPC/NOAA com os de precipitação observados em estações ou postos pluviométricos, tanto para pequenas áreas, como por exemplo, Sena et al. (2012) que realizaram um estudo para a região do Cariri Paraibano durante o período de 1979 a 2010, e obtiveram boa correlação entre as séries com coeficiente que variaram entre 0,58 a 0,89, todos significantes a 95% de confiança, bem como demonstraram que os dados do CPC/NOAA também conseguiram reproduzir bem o trimestre chuvoso, que ocorre entre os meses de fevereiro a abril, na área em estudo. Enquanto, Juárez et al. (2009) realizaram estudos para uma área cobrindo a parte central do Nordeste confinada entre as latitudes de 10°S e 5°S e as longitudes de 45°W e 35°W, e também concluíram que os dados do CPC/NOAA captam com precisão o ciclo anual e os totais mensais da precipitação da área analisada. Matsunaga et al. (2023) compararam os dados de precipitação do CPC/NOAA com os de estações meteorológicas do estado da Bahia, e também

afirmaram que os dados do CPC/NOAA representam muito bem os dados observados em estações meteorológicas.

De Souza Cardoso & De Quadro (2017), analisaram o desempenho da nova geração de dados de precipitação do Climate Prediction Center (CPC) para região Sul do Brasil e comparou com dados observados em estações meteorológicas INMET e ANA. A acurácia dos dados mostrou bom desempenho dos dados do CPC comparado aos do INMET e ANA e sazonalmente, os dados do CPC apresentaram melhor desempenho em todos os parâmetros estatísticos avaliados.

Observa-se na Tabela 2 que, com exceção da estação do Recife, a variável velocidade do vento apresenta valores de MAE, MAPE, REQM, SES relativamente baixos e coeficiente de correlação elevado indicam que a reanálise ERA5-Land pode ser utilizada para estimativa destas variáveis no NEB, pois até mesmo para a estação do Recife as discrepâncias, com exceção do MAPE, não foram muito elevadas e o coeficiente de correlação foi de 0,404 (Tabela 2), possivelmente estes valores são decorrentes da posição geográfica da estação do Recife, que está em uma área com altitude inferior à sua vizinhança.

Por um lado, Araújo et al., (2022), analisaram estatisticamente a temperatura do ar estimada por reanálise ERA5-Land com dados de superfície para o estado de Pernambuco, e foi concluído que os dados concordam bem com as estações meteorológicas em quase todo o estado, apresentou uma acurácia da temperatura média do ar estimada pelo ERA5-Land com  $r^2=0,98$  e  $REQM=0,60^\circ\text{C}$ . Por outro lado, Matsunaga et al. (2023) realizaram estudos para o estado da Bahia, comparou as temperaturas obtidas em estações com as do ERA5-Land, para a temperatura mínima obtiveram correlações superiores a 0,85, e para a máxima superior a 0,72, que são estatisticamente significante em 99%, bem como erro percentual de estimativa inferior a 1,1%, para as temperaturas mínimas, e inferior a 1,09% para as temperaturas máxima.

O trabalho realizado por Lompar et al. (2019) analisaram a utilização de dados de temperatura de reanálises ERA5-Land para preenchimento em série da dados meteorológicos incompletas para diferentes paisagens, latitudes e altitudes, incluindo tropicais e latitudes médias. Foi realizada uma avaliação dos resultados em termos de erro quadrático médio (RMSE) obtidos com a utilização de dados horários e diários fornecidos, e o estudo mostrou RMSE médio muito baixo que variam de  $1,1^\circ\text{C}$  (Montecristo, Itália) a  $1,9^\circ\text{C}$  (Gumpenstein, Áustria), concluindo que em caso de dados de temperatura não disponível, os dados ERA5-Land podem ser usados para preenchimento de lacunas de temperatura.

Siefert et al. (2021) também avaliaram a performance de três produtos de reanálises (ERA5, GLDAS 2.1 e MERRA-2) para dados de velocidade do vento superficiais em escala diária a partir de dados observacionais de 521 estações meteorológicas para o período de 2000-2018 no Brasil. Dentre os três produtos, o ERA5 apresentou uma maior acurácia para as zonas climáticas do país em termos de tendências médias e sazonalidades. Para a mesma variável, Fernandes et al. (2021) realizou a comparação com observações de vento de três regiões costeiras do Brasil, Maranhão, Santa Catarina e Bacia do Santos com reanálise atmosférica ERA5 do ECMWF e os resultados demonstram que o ERA5 é adequado para análise de escala diária a mensal das velocidades do vento, pois apresentou  $r \geq 0,74$ , porém a resolução do modelo atual impede uma representação próxima da variabilidade diurna em locais onde a brisa do mar é importante componente da circulação.

Além disso, o trabalho realizado por Jiang et al. (2020) analisaram os desvios das medições in situ de 98 locais com dados de radiação horária do ERA5 para a China, e os resultados revelaram que as estimativas da reanálise se correlacionaram bem com as observações do solo e refletem completamente a características regionais e variações diárias em locais individuais.

Contudo, diante da estatística apresentada e dos trabalhos similares já realizados, os dados de reanálises podem ser utilizados para suprir a ausência de registro de dados em estações meteorológicas, surgindo como uma alternativa para realizar e aprimorar os estudos relacionados a mudanças e dados climáticos que dependem de série de dados de longo prazo, como, por exemplo, no NEB.

### *3.2 Relação índices de vegetação e índices climáticos.*

Após a validação dos dados da reanálise, foram obtidas as imagens de NDVI e EVI, calculados o déficit hídrico, os índices climáticos  $I_a$  e  $I_{aUNEP}$  para a área de estudo, sendo este último, um dos índices utilizado atualmente para realizar a classificação climática de Semiárido Brasileiro.

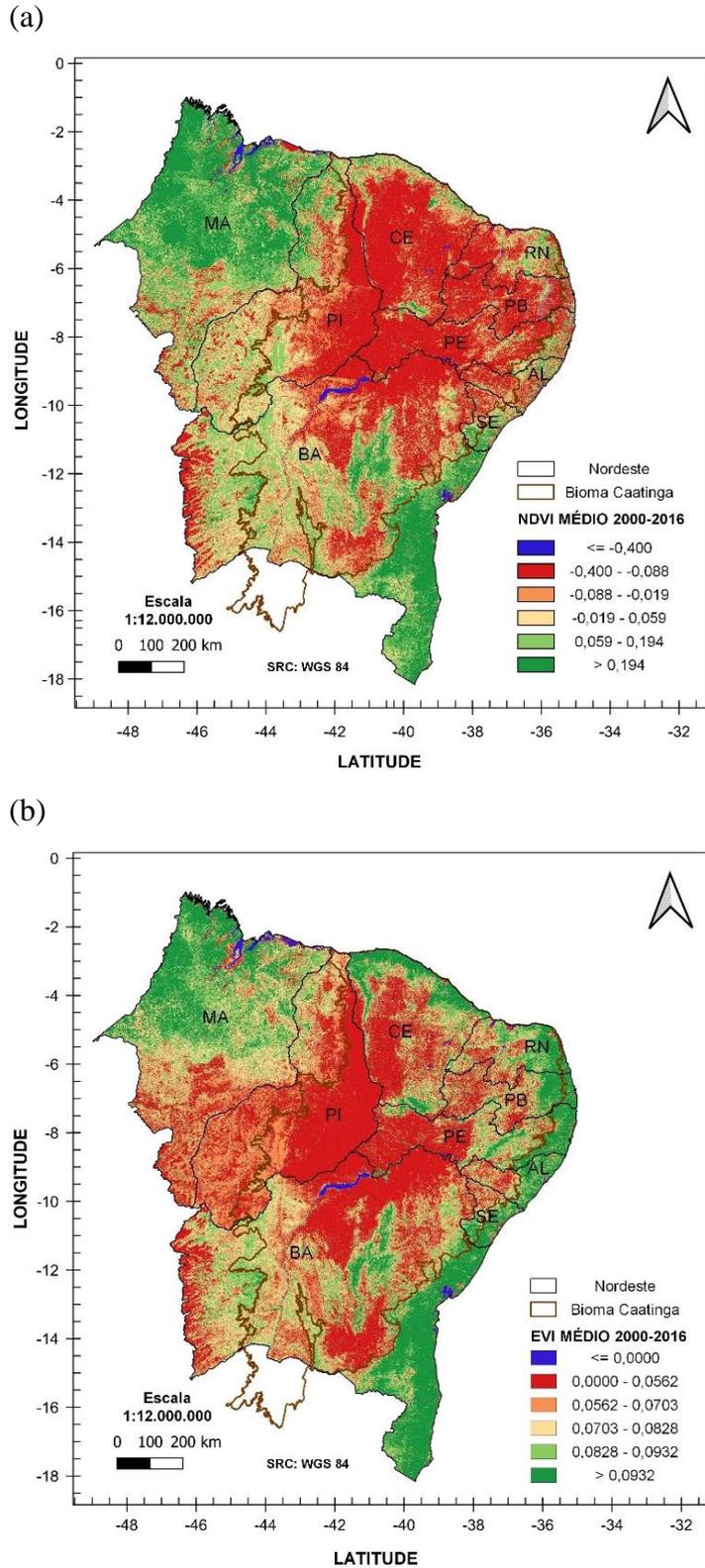
Nas Figura. 2a e b são apresentadas às configurações espaciais de NDVI e EVI médios para o mesmo período utilizado no estudo 2000-2016. Observa-se que os valores de NDVI estão no entre intervalo de -0,400 e 0,194, enquanto os de EVI encontram-se entre 0,000 e 0,0932. É possível observar que a configuração espacial dos índices de vegetação acompanha as dos índices climáticos Figura. 3a e b e Figura. 4, como, por exemplo, para o clima do tipo semiárido

que se estende em toda a região central do Nordeste, compreendendo 53,8% de 1.552.175 km<sup>2</sup>, área total do NEB apresenta os valores de NDVI e EVI extremamente baixos (destacado em vermelho e laranja), isso indica baixa condição hídrica da vegetação, predominantemente a caatinga, que por possuir defesa própria de sua fisiologia vegetal em respostas ao elevado déficit hídrico e aridez para a região (Figura. 3a e b), perdem suas folhas com o objetivo de evitar a transferência do vapor de água para o ar através da transpiração, garantindo assim a sua sobrevivência durante o período seco até haver o retorno das precipitações novamente. Segundo Lima e Carvalho (2018), quanto mais próximo de 1, maior a quantidade de vegetação presente na área de estudo.

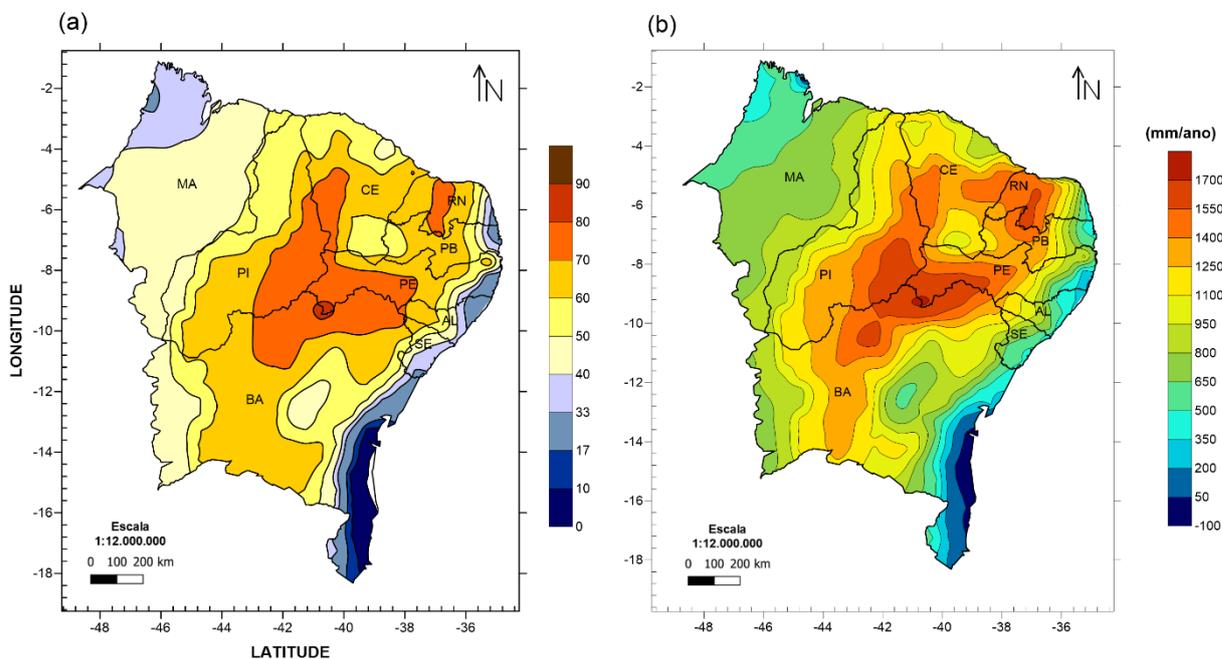
Nas Figuras 3a e b são mostrados o índice de aridez e o déficit hídrico da região do NEB, respectivamente, calculados com o uso utilizando os dados de reanálises. Foram observados valores máximos de déficit hídrico de até 1700 mm/ano localizado na mesorregião do Submédio São Francisco e área central do Estado do Rio Grande do Norte, devido esta região apresentar características específicas de temperatura, déficit hídrico e evapotranspiração elevadas, constantemente, e assim provocar valores elevados de aridez, como pode ser visto na Figura. 3 a e b, que comparadas as Figura. 2a e b, podemos enxergar nessas regiões valores de NDVI e EVI extremamente baixos devido às condições climáticas locais que afetam diretamente o comportamento negativo da vegetação.

Trabalho realizado por Marengo et al., (2016) analisou o déficit hídrico do NEB durante os anos de seca 2011-2016, obtendo uma média climatológica para este período na região de apenas 650 mm, onde a maior concentração de déficit hídrico incluiu particularmente o norte da Bahia, oeste do Pernambuco e o leste do Piauí, tendo como resultado estresse hídrico vegetativo, baixa produtividade vegetal e conseqüentemente o aumento de aridez. Ressalta-se que, nestas áreas citadas por Marengo et al., (2016), o índice de aridez e déficit hídrico apresentaram valores elevados (Figura. 3a e b), que podem estar associados ao rigor do período de estiagens que a região tem passado nos no período de 2012 a 2017.

Figura 2. (a) NDVI e (b) EVI médios para o período de 2000-2016.



**Figura 3.** (a) Índice de Aridez e (b) Déficit Hídrico (mm/ano).



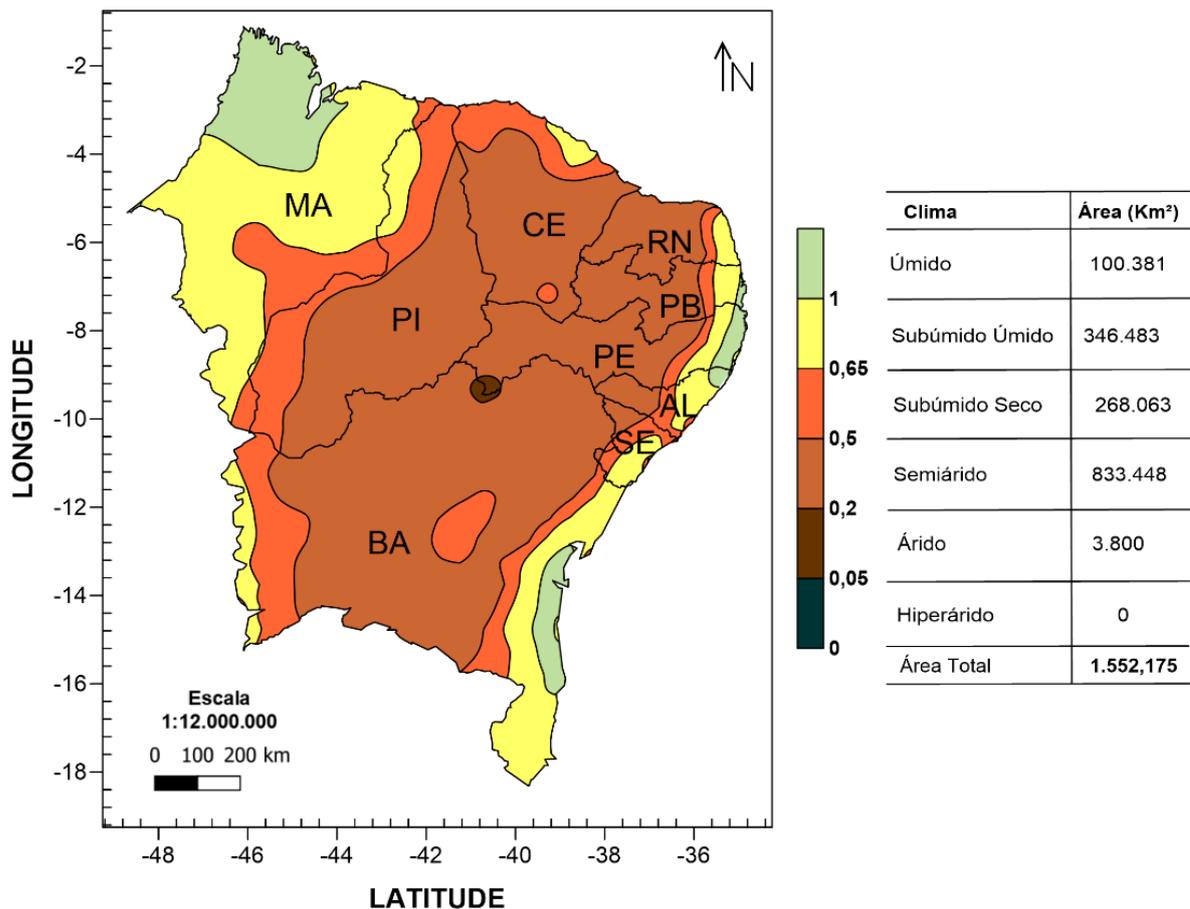
Lopes et al., (2017) encontraram resultados semelhantes aos apresentados nas Figura. 3a e b, eles realizaram o cálculo do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro no período de 1961 a 2015 e concluíram que a região Semiárida do Nordeste do Brasil apresenta tendências estatisticamente significativas de aumento nas condições de aridez e que a região pode se tornar área de grande processo de desertificação.

Na Figura. 4 é mostrada a classificação climática utilizando o  $I_{aUNEP}$ , verifica-se que o  $I_{aUNEP}$  conseguiu representar bem a transição dos tipos climáticos da região litoral ao interior, de úmido a semiárido. A maior área em destaque é a região semiárida com 834.448 km<sup>2</sup>, em que representa 53,8% de 1.552.175 km<sup>2</sup>, área total do NEB. Comparado estes resultados com os de Sales et al. (2021), que realizaram uma classificação climática para região do Nordeste Brasileira, utilizando dados climatológicos do INMET 1981-2010 e o  $I_{aUNEP}$  calculado com o emprego da  $ET_0$  de Penman-Monteith-FAO, obtiveram uma área total de 812.026,9 km<sup>2</sup> de clima semiárido, valor muito próximo ao obtido no presente estudo.

Pode-se observar uma pequena área árida de 3.800 km<sup>2</sup> que está inserida na mesorregião do Submédio São Francisco (Figura. 4), esta região apresenta características específicas de temperatura, evapotranspiração elevadas e precipitação irregular com média anual inferior a

500 mm e à presença de solo exposto (Da Silva Brito et al., 2017; De Andrade Silva et al., 2021).

**Figura 4.** Classificação climática para o NEB de acordo com o  $I_{aUNEP}$ .



Comparando as Figura. 3a e b, verifica-se que uma área ampla que se estende deste o Piauí até a divisa da Bahia com Alagoas e Sergipe, apresentou índice de aridez e déficit hídrico elevado, mas não correspondeu a apenas um núcleo pequeno e isolado de clima árido entre Juazeiro-BA e Petrolina-PE como mostrado na Figura. 4, que deveria ter sido maior. Por outro lado, ainda é possível observar que com o uso dos dados do ERA5-Land e CPC/NOAA no cálculo do  $I_{aUNEP}$  é plausível identificar na região central da Bahia-BA e sul do estado do Ceará-CE, áreas de clima subúmido seco, justamente onde fica localizada a chapada diamantina na BA e a Chapada do Araripe no CE, região serrana com altitudes elevadas e precipitação média anual superior as áreas circunvizinhas.

Quando comparadas as Figura. 2a e b com as Figura. 3a e b e Figura. 4 é possível identificar na região central da Bahia-BA e sul do estado do Ceará-CE, onde fica localizada a

chapada diamantina na BA e a Chapada do Araripe no CE, região serrana com altitudes elevadas e precipitação média anual superior as áreas circunvizinhas, área menos árida, com baixo déficit hídrico, clima subúmido seco e NDVI e EVI elevados, isso evidencia que há vegetação com disponibilidade hídrica conforme condições climáticas amena, e corrobora com que os dados de reanálises consegue identificar e se correlacionar bem com as condições favoráveis da vegetação. Além disso, o comportamento dos valores de NDVI e EVI elevados nas regiões litorâneas dos estados do Nordeste acompanha a transição dos tipos de clima úmido até o semiárido, à medida que vai se distanciando para a região central do Nordeste que é mais seco, árido e baixa disponibilidade hídrica da vegetação.

Realizada a mesma comparação que antes, podemos observar na Figura. 4 que na região entre Petrolina e Pernambuco foi obtido o tipo de clima árido que está diretamente associado ao índice de aridez e déficit hídrico (Figura. 3a e b) onde é possível enxergar nos mapas de NDVI e EVI valores muitos baixos, pois indica baixa disponibilidade hídrica para a vegetação nessa região. Da Silva Brito et al. (2017), analisando o comportamento da vegetação nas áreas de Caatinga preservada no município de Petrolina – PE, relataram que a prevalência de valores entre 0 e 0,2 geralmente está associada à presença de solo exposto. Bilar et al. (2018), monitorou a cobertura vegetal por meio de índices biofísicos no Parque Estadual da Mata da Pimenteira (PEMP), região semiárida de Pernambuco, e encontraram resultados semelhantes, em que em 2016, no início do período mais seco da região, para o NDVI os resultados dos índices foram inferiores a 0,40, com a indicação de alto estresse hídrico, ausência de folhas e grandes áreas de solo exposto.

Desta forma é possível observar que os valores de NDVI e EVI com baixa aridez, baixo déficit e tipo de clima mais úmido, apresentaram valores na faixa de 0,059 - > 0,194 e 0,0828 - > 0,0932 indicando maior presença de umidade no solo, planta e menor estresse hídrico. O contrário acontece quando tem elevada aridez, alto déficit hídrico e tipo de clima mais seco (árido e semiárido) em que apresentam valores de NDVI e EVI mais baixos, que estão relacionados a menor presença de umidade no solo e planta. A combinação de mudanças climáticas na carência ou falta de chuvas, seguidas de altas temperaturas e altas taxas de evaporação e concorrência por recursos hídricos, pode levar a uma crise potencialmente desastrosa onde as populações mais pobres são as mais vulneráveis, como os agricultores do semiárido do Nordeste, pois a região já enfrenta um problema crônico de escassez hídrica (Marengo et al., 2016).

Silva et al., (2020) realizou os cálculos de índices de seca, aridez e de vegetação a fim de estabelecer diagnósticos e prognósticos que ajudem na gestão dos recursos hídricos. Foi obtida correlações espaciais e pontuais afirmando que o uso de índices de vegetação como o NDVI e EVI obtidos por meio de sensoriamento remoto pode ser empregado como método alternativo aos índices físicos, de seca e de aridez, como ferramenta para o monitoramento de eventos extremos, assim como, indicação de áreas susceptíveis ao processo de desertificação. Além disso, podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos pelos órgãos gestores, indicando a evolução dos fenômenos hidrológicos extremos, sugerindo a adoção de ações preventivas e mitigadoras quanto ao uso prioritário da água.

Finalmente, comparando a Figura 2 com as 3 e 4 observa-se que, com exceção das áreas densamente antropizadas, como o extremo oeste da Bahia, em geral, as áreas que apresentam clima com maior grau de aridez e maior déficit hídrico na atmosfera são as que apresentam menores índices de vegetação, o que demonstra o alto grau de vulnerabilidade destas áreas, apontando que é muito proeminente o uso racional das terras, com preservação e recuperação da cobertura original. Dentro deste contexto, é descrever as observações de Lacerda et al. (2020) que descreveram esclareceram que a vulnerabilidade ambiental do semiárido está associada ao clima da região, e isto impõe a necessidade de recuperação e de preservação da cobertura natural, já que qualquer alteração feita nela, tem como consequência mudança no tipo de clima mais seco, desta forma é preciso utilizar práticas indutoras de prosperidade social em harmonia com o ambiente. Portanto, as informações geradas no presente estudo são importantes para subsidiar ações de recuperação de áreas degradadas, criação de políticas públicas, planejamento e gestão ambiental.

## Conclusões

- Os dados de reanálise ERA5-Land e de precipitação do CPC/NOAA são confiáveis e podem ser utilizados, na ausência de dados observados ou duvidosos, para estudos e análises climáticas e ambientais no NEB.
- As configurações espaciais obtidas para os índices de aridez e o déficit hídrico da atmosfera proposto por Thornthwaite e do índice de aridez do UNEP obtidas com os dados da reanálise captaram as condições detalhadas da climatologia regional, isto confirma que os dados de reanálise é uma excelente fonte de dados estudos ambientais no NEB, principalmente na ausência de dados observados.

- Os padrões espaciais de NDVI e EVI foram eficazes para a compreensão da variabilidade espacial, do vigor vegetativo e da presença de umidade nas áreas vegetativas da área estudada por terem sido condizentes com os tipos de clima obtido. As regiões mais secas revelaram menor exuberância da vegetação, em relação as mais úmidas, indicando que os índices de vegetação são ferramentas adicionais que podem ser utilizados na elaboração da classificação climática da região.
- Os resultados obtidos corroboram com a possibilidade de uso de métodos alternativos para o acompanhamento e monitoramento da seca e da aridez na área de estudo, utilizando índices climáticos, obtidos por dados de reanálise e estações, e NDVI e EVI.

### Referências Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Aragão, L. E., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., ... & Saatchi, S. (2018). *21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions*. *Nature communications*, 9(1), 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>.
- Araújo, C. S. P. D., Silva, I. A. C. E., Ippolito, M., & Almeida, C. D. G. C. D. (2022). *Evaluation of air temperature estimated by ERA5-Land reanalysis using surface data in Pernambuco, Brazil*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 381. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10047-2>.
- Bilar, A. B. C., de Mendonça Pimentel, R. M., & Cerqueira, M. A. (2018). *Monitoramento da cobertura vegetal através de índices biofísicos e gestão de áreas protegidas*. *Geosul*, 33(68), 236-259. <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n68p236>.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). *ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications*. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

Da Silva Brito, P. V., Morais, Y. C. B., dos Santos Ferreira, H., da Silva, J. F., & Galvêncio, J. D. (2017). *Análise comparativa da umidade da vegetação de áreas de caatinga preservada, agricultura irrigada e sequeiro*. Journal of Environmental Analysis and Progress, 493-498. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1481.493-498>.

De Souza Cardoso, C., & de Quadro, M. F. L. (2017). *Análise comparativa de dados de precipitação gerados pelo “Climate Prediction Center–CPC” versus dados observados para o Sul do Brasil*. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(04), 1180-1198. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1180-1198>.

Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V. B., Kousky, V. E., Wayne Higgins, R., & Janowiak, J. E. (2008). *Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D4). <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>.

Dantas, R. T., Marengo, J. A., Ambrizzi, T., & Torres, R. R. (2020). *Climate change scenarios over Northeast Brazil for the 21st century using the Eta regional climate model at 5-km resolution*. Journal of Climate, 33(8), 3063-3082.

De Andrade Silva, G., & de Andrade Farias, C. W. L. (2021). *Análise espaço-temporal da vegetação no semiárido do Nordeste brasileiro utilizando parâmetros biofísicos*. Revista Semiárido De Visu, 9(3), 195-203. <https://doi.org/10.31416/rsdv.v9i3.232>.

Domingues, M. O., Costa, J. C. F., Sousa, A. M. O., Lima, V. C., & Silva, A. L. (2019). *Assessing spatiotemporal changes of vegetation in northeastern Brazil using multiple vegetation indices and machine learning algorithms*. Journal of Arid Environments, 170, 1(13). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104015>.

*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF* (2021). Disponível em: <https://www.ecmwf.int>. Acesso em: 05 jan. 2021.

Jingyun, F., Yongchang, S., Hongyan, L., & Shilong, P. (2002). *Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China*. Acta Botanica Sinica, 44(9), 1105-1122.. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-9072.2002.05.005>.

Feindouno, S., Guillaumont, P., & Simonet, C. (2020). *The physical vulnerability to climate change index: An index to be used for international policy*. *Ecological Economics*, 176, 106752. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106752>.

Fernandes, I. G., Pimenta, F. M., Saavedra, O. R., & Silva, A. R. (2021). *Offshore validation of ERA5 reanalysis with hub height wind observations of Brazil*. *IEEE PES innovative smart grid technologies conference-Latin America*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9542993>.

Gleixner, S., Demissie, T., & Diro, G. T. (2020). *Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa?*. *Atmosphere*, 11(9), 996. <https://doi.org/10.3390/atmos11090996>.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020*. Brasília: Inmet, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais> (acessado em 26 de setembro de 2023).

Jiang, Y., Shi, C., Chen, Y., Luo, Y., Li, B. (2020). *Spatiotemporal dynamics of vegetation cover and their response to climate change in the Hunshandake Sandy Land, China*. *Sustainability*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114511>.

Juárez, R. I. N., Li, W., Fu, R., Fernandes, K., & de Oliveira Cardoso, A. (2009). *Comparison of precipitation datasets over the tropical South American and African continents*. *Journal of hydrometeorology*, 10(1), 289-299.

Lacerda, F. F., Lopes, G. M. B., & de Albuquerque, M. M. (2020). *Viveiros educadores na Caatinga—mitigação aos efeitos da mudança do clima no semiárido brasileiro*. *Agrometeoros*, 26(2). <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i2.26412>.

Lima, L. B., & de Carvalho, H. D. S. *A evolução do índice de vegetação e água como indicadores da ocorrência de desmatamento na APA Serra Branca/Raso da Catarina em Jeremoabo—BA*.

Lompar, M., Lalić, B., Dekić, L., & Petrić, M. (2019). *Filling gaps in hourly air temperature data using debiased ERA5 data*. *Atmosphere*, 10(1), 13.

Longo-Minnolo, G., Vanella, D., Consoli, S., Pappalardo, S., & Ramírez-Cuesta, J. M. (2022). *Assessing the use of ERA5-Land reanalysis and spatial interpolation methods for retrieving precipitation estimates at basin scale*. Atmospheric Research, 271, 106131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106131>.

Lopes, I., SANTOS, S. D., Leal, B. G., & MELO, J. (2017). *Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro*. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(4), 1014-1026. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1014-1026>.

Marengo, J. A., Cunha, A. P., & Alves, L. M. (2016). *A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico*. Revista Climanalise, 3(1), 49-54.

Matsunaga, W. K., Sales, E. S. G., Júnior, G. C. A., Silva, M. T., Lacerda, F. F., de Paiva Lima, E., ... & de Brito, J. I. B. (2023). *Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia—Brazil*. Theoretical and Applied Climatology, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04670-3>.

McNicholl, B., Lee, Y. H., Campbell, A. G., & Dev, S. (2021). *Evaluating the reliability of air temperature from ERA5 reanalysis data*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3137643>.

Middleton, N., Thomas, D. *World Atlas of Desertification*. London: UNEP, 1992.

Middleton, N., Thomas, D. *World Atlas of Desertification*. London: UNEP, 1997.

Oliver, J. E. (1978). *Climate and man's environment: an introduction to applied climatology*.

Paredes, J. A., Bravo, M. A., Ferrada, P. A. (2020). *Evaluation of ERA5 Reanalysis and RCP 4.5 Climate Scenarios in the Hydrological Simulation of Chilean High Andes Catchments*. Water, 12 (5). <https://doi.org/10.3390/w12051315>.

Wang, Z., Wu, J., Niu, B., He, Y., Zu, J., Li, M., & Zhang, X. (2020). *Vegetation expansion on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change*. Remote Sensing, 12(24), 4150. <https://doi.org/10.3390/rs12244150>.

QIU, Shi et al. *Can Landsat 7 preserve its science capability with a drifting orbit?*. Science of Remote Sensing, v. 4, p. 100026, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100026>.

Ribeiro Neto, G. L., Sato, M. I., Silva, M. E. S., Ferreira, R. N., & Souza, A. R. (2020). *Estimating rainfall from weather radar using the random forest regression algorithm: case study in northeast Brazil*. *Hydrology Research*, 51(5), 739-752. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.157>.

Rocha, A. H., Ambrizzi, T., Marengo, J. A., & Kayano, M. T. (2021). *Precipitation and surface air temperature variability over northeastern Brazil under different El Niño-Southern Oscillation regimes*. *International Journal of Climatology*, 41(1), E30-E50. <https://doi.org/10.1002/joc.6611>.

Rolim, G. S., Sentelhas, P. C., & Barbieri, V. (1998). *Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial*. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6, 133-137.

Sales, E. S. G., Matsunaga, W. K., Nunes, M. M. A. M., Baracuy, J. H., Da Cunha Campos, J. M. A., & De Brito, J. I. B. (2021). *Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 479-491. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p479-491>.

Santos, F. A., Soares, J. V., Carvalho, D. F., & Oliveira, R. S. (2022). *Long-term variability and trend analysis of the rainfall distribution in the state of Bahia, Northeast Brazil*. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3-4), 1423-1433. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03838-4>

Schumacher, R. S., Jarosch, A. H., Ellis, R. J., & Crothers, S. R. (2020). *Quantifying the potential of ERA5 data for hydrological modelling in poorly-gauged catchments*. *Journal of Hydrology*, 589. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125175>.

Sena, J. P. O., Melo, J. S., Lucena, D. B., Melo, E. C. S. (2012). *Comparação entre dados de chuva derivados do Climate Prediction Center e observados para a região do Cariri Paraibano*. *Revista Brasileira de Geografia Física* 2, 412-420. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i2.232810>.

Siefert, C. A. C., Dombrowski Netto, N., Marangon, F. H. S., Schultz, G. B., Silva, L. M. D. R., Fontenelle, T. H., & Santos, I. D. (2022). *Avaliação de Séries de Velocidade do Vento de Produtos de Reanálises Climáticas para o Brasil*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 689-701. <https://doi.org/10.1590/0102-7786360026>.

Silva, A. J. A., Bezerra, J. F., Marengo, J. A., & Santos, T. A. (2021). *Analysis of Dry Spells in Northeast Brazil Based on TRMM Data*. *Advances in Meteorology*, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2021/8864561>.

Silva, M. E. S., Santos, T. A., Marengo, J. A., & Correa, D. S. (2020). *A Comparative Analysis of GCM and RCM Projections of Precipitation Extremes over Northeast Brazil*. *Water*, 12(7), 1985. <https://doi.org/10.3390/w12071985>.

Souza, R. S., Silva, A. J. A., & Lopes, A. V. (2020). *Precipitation trends and variability over northeast Brazil: Long-term analysis (1912-2015)*. *Atmospheric Research*, 246, 105107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105107>.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. (2021). *Delimitação do Semiárido – 2021: Relatório Final*. Recife, 272 pp.

Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

Thornthwaite, C., Matter, J. *The water balance, publication in climatology*. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.

UNEP. United Nations Environment Programme. (1992). *World Atlas of Desertification*. Londres, 69 pp.

Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O. R., Ramírez-Cuesta, J. M., Pappalardo, S., Consoli, S., ... & Gandolfi, C. (2022). *Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy*. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>.

Wang, L., Gao, Y., Chen, Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). *Evaluation of the ERA5 reanalysis dataset for the simulation of precipitation extremes in China*. *Journal of Hydrology*, 606, 126978. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126978>.

Wu, G., Qin, S., Mao, Y., Ma, Z., & Shi, C. (2022). *Validation of precipitation events in ERA5 to gauge observations during warm seasons over eastern China*. *Journal of Hydrometeorology*, 23(5), 807-822. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0195.1>.

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., ... & Zhu, Z. (2019). *Current status of Landsat program, science, and applications*. *Remote sensing of environment*, 225, 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>.

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). *New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)*. *International Journal of Climatology*, 42(16), 8390-8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

Xu, X., Huang, X., Zhao, X., Yan, Q., Yang, L., & Li, Z. (2022). *Monitoring the impact of climate variability on vegetation dynamics in the Northeast China Transect using remote sensing data*. *Remote Sensing*, 14(6), 1139. <https://doi.org/10.3390/rs14061139>.

Zhang, L., Zhu, G., Xiao, P., Zhao, L., & Wang, J. (2021). *Spatiotemporal variation of vegetation response to climate change in the eastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau*. *Journal of Environmental Management*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113538>.

Zhu, X., Xu, L., Xie, Y., Zhang, X., Huang, J., & Gong, Y. (2021). *Responses of vegetation to climate change and human activities in a semi-arid region of the Chinese Loess Plateau*. *Ecological Indicators*, 126. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22048>.

Zhu, Z., Wulder, M. A., Roy, D. P., Woodcock, C. E., Hansen, M. C., Radeloff, V. C., ... & Scambos, T. A. (2019). *Benefits of the free and open Landsat data policy*. *Remote Sensing of Environment*, 224, 382-385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.016>.