



Áreas suscetíveis a desertificação no Nordeste do Brasil e projeção para cenário de mudanças climáticas

Jessica Barretos de Moraes¹, Henderson Silva Wanderley², Rafael Coll Delgado³

¹ MS. Programa de Pós Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RB 465 Km 07, s/n, CEP 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro. <https://orcid.org/0000-0002-0484-8995>

² Professor Dr., Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Floresta, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RB 465 Km 07, s/n, CEP 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro. e-mail: henderson@ufrj.br. <https://orcid.org/0000-0002-4031-3509> (autor correspondente).

³ Professor Dr., Centro de Ciências Biológicas e da Natureza-CCBN, Unidade Federal do Acre, Distrito Industrial, Rio Branco, AC, 69920. <https://orcid.org/0000-0002-3157-2277>

Artigo recebido em 13/06/2023 e aceito em 25/05/2024

RESUMO

A desertificação é o processo de degradação do solo em áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas a partir de causas naturais e/ou antrópicas. Além da sua abrangência mundial, a desertificação tem sido considerada um dos mais graves problemas que atinge as dimensões social, econômica e ambiental. Identificar essas regiões pode subsidiar o planejamento do uso racional da água visto que essas áreas apresentam restrições hídricas e são afetadas pelas variabilidades climáticas. Uma das formas de avaliar é a partir do índice de aridez (IA), que permite classificar as áreas quanto às suas características climáticas. Assim, a presente pesquisa tem como objetivo identificar as áreas suscetíveis à desertificação no Nordeste do Brasil (NEB), a partir do índice de aridez, e suas alterações para cenário de mudanças climáticas. Foram utilizados dados de temperatura do ar e precipitação para o período baseline 1990 a 2018 e cenário futuro de mudanças climáticas (CFMC) de 2021 a 2040. Para o CFMC foi utilizada projeção de oito modelos do CMIP-6 para o cenário de mudança intermediário SSP 4.5. O IA foi calculado a partir da metodologia de Thornthwaite (1948) e complementada por Penman (1953). Os resultados indicaram para o período atual predominância do clima semiárido no Nordeste. Para o cenário SSP 4.5 a projeção aponta aumento para clima árido e suscetibilidade à desertificação muito alta. As mudanças climáticas podem provavelmente aumentar as áreas de alta suscetibilidade à desertificação no Brasil, representando um desafio na gestão brasileira dos recursos hídricos e sua capacidade de suprimento.

Palavras-chave: temperatura do ar, precipitação, índice de aridez.

Susceptible areas to desertification in the Brazil Northeast and projection for climate change scenarios

ABSTRACT

Desertification is the process of soil degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid areas from natural and/or anthropogenic causes. In addition to its worldwide phenomenon, desertification has been considered one of the most serious problems that affects social, economic and environmental dimensions. Identifying these regions can support the planning of the rational use of water since these areas have water restrictions and are affected by climate variability. One of the ways to evaluate is from the aridity index (AI), which allows classifying the areas according to their climatic conditions. Thus, the present research aims to identify susceptible areas to desertification in the Northeast of Brazil (NEB), based on the aridity index, and its changes to future climate change scenario. Air temperature and precipitation data were used for the baseline period 1990 to 2018 and future climate change scenario (FCCS) from 2021 to 2040. For the FCCS, future projections of eight models were used, with CMIP-6 projections for the intermediate scenario SSP 4.5. The AI was calculated from the methodology of Thornthwaite (1948) and complemented by Penman (1953). The results indicated for the current period predominance of the semi-arid climate in the Northeast. For the SSP 4.5 scenario, the projection points to an increase in arid climate and very high susceptibility to desertification. Climate change may likely increase the areas of high susceptibility to desertification in Brazil, facing a challenge in the Brazilian management of water resources and their supply capacity

Keywords: air temperature, precipitation, aridity index.

Introdução

O processo de desertificação refere-se ao processo pelo qual a terra produtiva fora dos limites naturais do deserto se deteriora e perde sua capacidade de produção, afetando a agrícolas e a pecuária, onde essas regiões se transformam em deserto. A desertificação tem potencial maior para a degradação do solo nas áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas, decorrente de variações climáticas e atividades antrópicas (Al-Kulabi, 2022).

A degradação começa como pequenas manchas isoladas, que ficam maiores com o passar do tempo, até que essa expansão se combine, tornando-se uma faixa árida maior, semelhante a um deserto. Essa expansão transforma áreas agrícolas, de pastagens ou pecuária, em áreas improdutivas. Por seu grande impacto, a desertificação vem sendo um desafio para as vertentes socioeconômicas, climáticas e ambientais (Schenkel e Matallo Júnior, 1999; Dourado, 2017; Wu et al., 2018).

A desertificação pode ser decorrente de processos naturais, como condições climáticas adversas, relacionados a grandes variações de temperatura, uma vez que as regiões de clima semiárido apresentam grandes oscilações de temperatura, a qual causa a fragmentação do solo. Os eventos extremos de precipitação relacionados a seca e erosão, os quais causam a degradação do solo e a supressão de sua vegetação. As enxurradas, caso venham a ocorrer podem lixiviar o solo. Velocidade e direção do vento, quanto maior a velocidade do vento, maior é seu efeito em fragmenta as partículas de solo movendo-as para outros lugares. Radiação solar provoca grande oscilação diária de temperatura, que acelera o processo de desintegração do solo e de desertificação.

No semiárido brasileiro, que representa ~11% do território, aproximadamente 16% das terras são suscetíveis à desertificação (Alvalá et al., 2017). Aspecto importante para acelerar o processo de desertificação é o crescimento populacional em locais secos, semiáridos e subúmidos, que no Nordeste do Brasil pode afetar cerca de 35 milhões de pessoas (CGEE, 2016).

O crescimento populacional aumenta a pressão sobre os recursos destas áreas, acelerando o desenvolvimento e a propagação da desertificação. Essa relação é de grande relevância para a região Nordeste do Brasil, uma vez que a região semiárida brasileira é a mais populosa do planeta. Segundo a Conferência das Nações Unidas

sobre a Desertificação (UNCCD, 1994) estabeleceu diretrizes para a população máxima presente nas zonas secas seja de 7 pessoas por quilômetro quadrado, e nas zonas semiáridas de 20 pessoas por quilômetro quadrado (Mirzabaev et al., 2019).

A pecuária também tem seu papel importante para a desertificação quando o número de animais no pasto é elevado. Esse grande número faz com que a pastagem seja pisoteada pelos animais, aumentando o pressão sobre o solo, contribuindo para a rápida destruição da cobertura vegetal, erosão do solo e degradação da capacidade biológica do ambiente (Al Makky et al., 2018)

Uso ineficiente de terra agrícolas pode contribuir para o avanço da desertificação. A agricultura extensiva ineficaz, a monocultura e a utilização de terras agrícolas para a construção de instalações industriais, comerciais e residenciais são partes dos processos que aceleram a desertificação. A pressão ambiental é resultado natural deste desenvolvimento agrícola, assim como a aceleração da deterioração do equilíbrio ecológico e a propagação de desertos

As mudanças climáticas são consideradas um dos desafios mais preocupantes que a humanidade vem enfrentando, e estas relacionam-se as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), que colaboram com a retenção de calor, tornando o planeta mais quente e afetando diretamente os padrões climáticos, a sociedade, fauna e flora. Deste modo, medir as trocas de efluxos entre o solo e a atmosfera é de extrema importância para contribuir com o entendimento acerca dos efeitos dos parâmetros bioquímicos na questão do aquecimento global e seus impactos como secas e desertificação (Al Makky et al., 2018).

As mudanças no clima podem potencializar o processo de desertificação devido as mudanças na precipitação, temperatura do ar e solo, evaporação, vento. Embora seja complexo avaliar como essas mudanças possam ser potencializadas pelas ações antrópicas. Segundo IPCC (2021) espera-se uma evolução gradativa da desertificação com os cenários futuros de mudanças climáticas. Um aumento de três graus na temperatura do ar resultará em um aumento de aproximadamente 210 mm na evapotranspiração potencial anual, ou 70 mm para cada grau Celsius anual (Al-Kulabi, 2022).

Segundo Zhao e Dai (2015) estimaram um aumento de aproximadamente 10% em áreas hiperáridas em todo o mundo devido às mudanças

climáticas. A desertificação é um processo global preocupante, com o potencial de causar perda econômica anual de 42 bilhões de dólares e afetar dois bilhões de pessoas direta ou indiretamente, com cinco milhões de pessoas sendo forçadas a migrar a cada ano (Elnashar et al., 2022).

De acordo com Oliveira Santana (2007), o Brasil possui áreas semiáridas e subúmidas secas, que abrangem porções territoriais dos estados do Nordeste e do norte de Minas Gerais (CGEE, 2016). Os estudos sobre do Índice de Aridez (IA) no Brasil são predominantes para o Nordeste brasileiro por esta ser a região mais árida do país e logo, a mais suscetível à desertificação. O semiárido brasileiro corresponde a aproximadamente 63% do Nordeste, 10% do Brasil e o total das áreas suscetíveis à desertificação (ASD) representa 15% do território do país, engloba 1.491 municípios e atinge mais de 31 milhões da população brasileira (CGEE, 2016).

No estudo realizado por Spinoni et al. (2015), o NEB apresentou aumento de mais de 45 mil km² de extensão de clima subúmido seco para semiárido e maior suscetibilidade à desertificação nos estados da Bahia e Pernambuco. Santos et al. (2010) verificou que os menores valores do IA no Nordeste foram observados no sertão tanto para o cenário atual quanto para os cenários futuros até 2100.

Os resultados apresentados por Moraes et al., (2023) indicaram um aumento das áreas de clima seco subúmido no Brasil, com tendência de alta e moderada suscetibilidade à desertificação, além de um aumento significativo nas áreas semiáridas, com tendência de alta suscetibilidade à desertificação até 2100. Para a região Nordeste foi verificado redução em áreas de clima úmido e subúmido e aumento para o clima semiárido, e principalmente clima árido, com a duplicação das regiões com esse clima no Nordeste.

Uma das formas de avaliar a desertificação é a partir do Índice de Aridez (IA), que relaciona a entrada de água pela precipitação e a perda de água pela evapotranspiração (Schenkel e Matallo Júnior, 1999). Este índice indica que a razão adimensional entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial nas regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas está entre 0,05 e 0,65 (CGEE, 2016). Ademais, o IA permite classificar as áreas quanto à sua condição climática, identificando a deficiência hídrica (Matallo Júnior, 2009), e conseqüentemente à suscetibilidade de ocorrência desse processo (Santos et al., 2015; Lopes et al., 2017). A aplicação do IA pode auxiliar na elaboração de políticas públicas voltadas para a

gestão eficiente dos recursos hídricos, recuperação das regiões afetadas, e conservação dos recursos naturais.

Em relação às atividades econômicas, a desertificação pode exercer pressão na disponibilidade hídrica do sistema brasileiro (Fernandes et al., 2018), ocasionando impactos no abastecimento humano, animal, nos recursos energéticos e produção agrícola (EPE, 2018). Embora o Brasil tenha posição de destaque mundial na matriz energética pela alta participação de fontes renováveis, cerca de 46,1% em 2019 (EPE, 2020), as principais fontes como biomassa da cana-de-açúcar e hidráulica, dependem das condições climáticas.

Além de afetar o setor energético, as mudanças climáticas também influenciam no setor agrícola. As alterações no ciclo hidrológico a partir do aumento da temperatura do ar, mudança na distribuição da precipitação e aumento da evapotranspiração (EPE, 2018), por exemplo, pode reduzir a segurança alimentar além de promover maior vulnerabilidade aos produtores rurais. Assim, a análise da aridez torna-se fundamental para avaliar como a mudança do clima pode impactar no avanço ou regresso da desertificação no Brasil.

A importância do IA no estudo da desertificação está na delimitação onde esse processo ocorre. Dessa forma, contribui para evitar generalização do processo, pois, sem esse elemento para delimitar a desertificação, qualquer área degradada poderia ser classificada como uma área desertificada (Barreto, 2015). Este trabalho tem como objetivo identificar áreas suscetíveis à desertificação no Nordeste do Brasil e suas alterações para cenário futuro de mudanças climáticas.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado para a região Nordeste do Brasil (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), que possui nove estados do Brasil, com dimensão em torno de 1,5 milhão km², desse total, mais de 900 km² corresponde ao semiárido, aproximadamente 63% do Nordeste e 10% do Brasil (CGEE, 2016). O NEB tem 26,91% da população brasileira, segundo o último Censo demográfico do IBGE (IBGE, 2023).

Em relação ao clima, o Nordeste apresenta os menores registros de precipitação (Alvares et al.,

2014), condições mais secas como o sertão do Ceará com valores em torno de 500 mm (Santos et al., 2009) e faixa litorânea com precipitação anual superior a 1.500 mm (Pereira et al., 2013). Além disso, prevê-se que a região Nordeste é a região do

Brasil que será mais afetada pelas mudanças climáticas, visto que a região semiárida é uma das áreas mais vulneráveis a esse fenômeno (Rêgo, 2012).

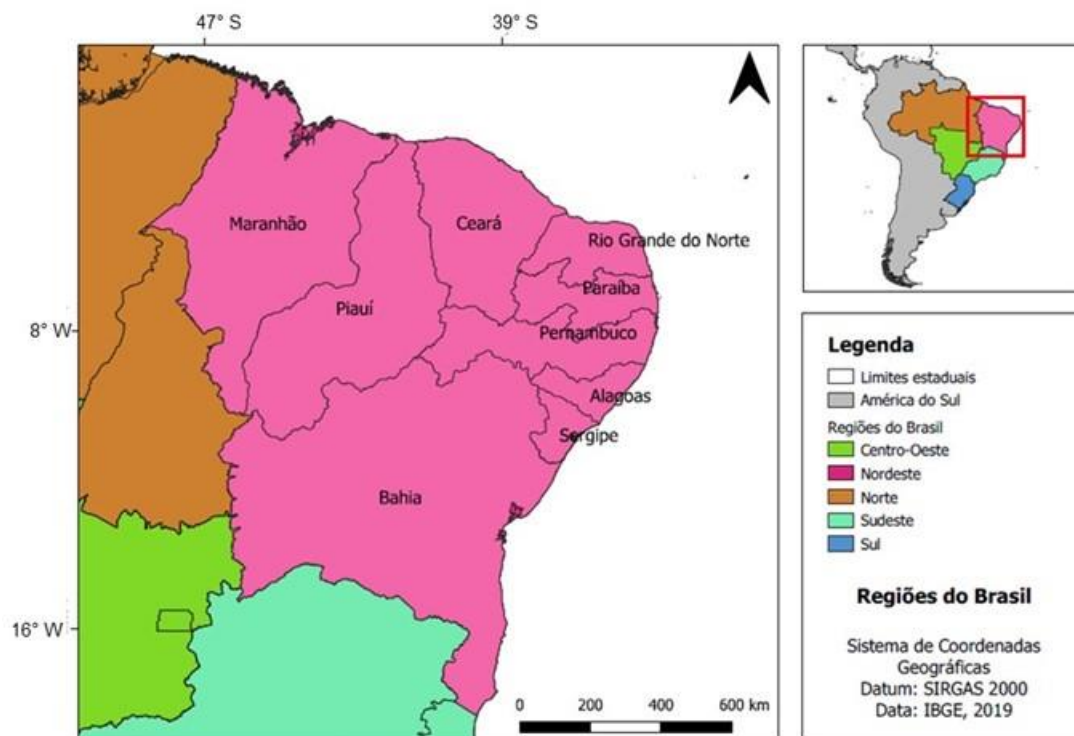


Figura 1. Região Nordeste do Brasil.

Dados Climáticos

O período de estudo foi dividido em baseline (1990-2018), considerado como referência, e a projeção futura no período entre 2021-2040 para o cenário futuro de mudanças climáticas SSP2 4.5. As variáveis climáticas utilizadas foram temperatura do ar máxima e mínima e precipitação total mensal.

Os dados baseline foram utilizados do Climatic Research Unit gridded Time Series (CRU-TS), East Anglia University (Harris et al., 2020), com resolução espacial de 2,5 minutos (~ 21 km²) (CRU-TS, 2020). A projeção futura do CMIP-6, foi obtida a partir da média dos oito modelos climáticos BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MIROC6 e MRI-ESM2-0. Os dados podem ser obtidos no sítio eletrônico https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_cli_m2.5m.html.

Foi utilizado o índice de aridez (IA) elaborado por Thornthwaite (1948) e complementado por Penman (1952), que avalia a deficiência hídrica de um determinado local a partir da razão entre a precipitação e a evapotranspiração (Oliveira Santana, 2007). Este índice foi utilizado na elaboração do World Atlas of Desertification, parâmetro para estudos em escala global (Schenkel e Matallo Júnior, 1999). Sua relevância nos estudos sobre desertificação deve-se ao fato de que este fenômeno está associado ao nível de aridez do local (Barros, 2010).

O IA é calculado a partir da razão entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial (Eq-1).

$$IA = \frac{P}{ETP} \quad (1)$$

em que,

P – Precipitação anual (mm);

ETP – Evapotranspiração potencial anual (mm).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial foi utilizado o método de Thornthwaite

(1948) (Eq-2 a 4), no qual a temperatura do ar máxima e mínima foram utilizadas para calcular a média aritmética da temperatura:

$$ETP = 16,2 [10 \times T / I]^a \quad (2)$$

em que,

ETP – Evapotranspiração potencial mensal (mm);

T – Temperatura média mensal do ar (°C);

I – Índice de calor anual (soma de 12 índices mensais);

a – Valor determinado em função do I.

$$I = \sum_{j=1}^{i=12} [T_j / 5]^{1,514} \quad (3)$$

$$a = 6,750 \times 10^{-8}I^3 - 7,711 \times 10^{-5}I^2 + 1,792 \times 10^{-2}I + 0,492 \quad (4)$$

A evapotranspiração fora da condição padrão de meses com 30 dias e 12 horas de brilho solar foi corrigida para.

$$C = \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{30} \quad (5)$$

em que,

C – Fator de correção;

N – Fotoperíodo de determinado dia (h).

Para o processamento dos dados foi utilizado o software estatístico R (R version 4.0.0).

Tabela 1. Classificação climática e suscetibilidade à desertificação de acordo com o índice de aridez.

Classificação	Índice de aridez (IA)	Suscetibilidade à desertificação
Hiperárido	< 0,05	Superior a alta
Árido	0,051 a 0,20	Muito alta
Semiárido	0,21 a 0,50	Alta
Subúmido seco	0,51 a 0,65	Moderada
Subúmido úmido e úmido	> 0,65	Inferior a moderada

Fonte: Adaptado de UNEP, 1992 e Schenkel e Matallo Júnior, 1999.

Resultados e discussão

Para a região Nordeste foi encontrado valores de IA com predominância abaixo de 0,40, classificada como semiárida e alta suscetibilidade à desertificação, para o período de 1990-2018 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A porção interior apresenta IA abaixo de 0,20, com distribuição climática árida e suscetibilidade à desertificação muito alta.

As regiões com muito alta suscetibilidade à desertificação são encontradas em todos os estados do NEB, com exceção do Maranhão. O

Dessa e Pippet, 2008). Além disso, foi utilizada a classificação climática de Thornthwaite (1948), segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1992) e a suscetibilidade à desertificação em função do nível de aridez apresentada no Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação (PAN) (Brasil, 2004) (Tabela 1). Sua metodologia permite classificar geograficamente as diferentes características climáticas de acordo com o valor do índice de aridez (Rolim et al., 2007; Bodas Terassi e Tommaselli, 2016).

De acordo com a denominação da UNCCD, as ASD são aquelas com IA entre 0,051 e 0,65, classificadas como árida, semiárida e subúmida seca, no qual quanto menor o índice, maior a aridez, ou seja, quanto mais árido o local, mais propenso à desertificação (Brasil, 1994; Schenkel e Matallo Júnior, 1999). Ademais, quanto menor o índice de aridez de uma determinada área, mais suscetível à desertificação. Ressalta-se que esse critério considera principalmente a aridez, e não o processo de desertificação, pois esse fenômeno também considera outros fatores além do climático (Brasil, 2004).

litoral norte do Maranhão apresenta porções classificadas tanto como subúmida seca e moderada quanto não suscetível à desertificação, como também observada na costa leste do NEB e oeste da Bahia.

ASD mais críticas são observadas nos estados do Piauí, Pernambuco e Bahia. Embora sejam também observadas ASD, com essa classificação, nos estados de Alagoas, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará.

Marengo e Bernasconi (2015) também observaram para NEB áreas áridas localizadas no norte da Bahia, parte central da Paraíba e

Pernambuco até o sul do Rio Grande do Norte, com aumento da cobertura semiárida, em áreas classificadas anteriormente como subúmida seca, semelhante a esta pesquisa.

Parte dessas mudanças advém da mudança e uso do solo, onde a vegetação primária no bioma Caatinga foi reduzida em -26,36% entre 1985 e 2020. Dos 10 municípios que mais perderam vegetação natural na Caatinga, oito estão localizados na Bahia. Consoante, 87,28% das áreas queimadas ocorreram nos estados do Piauí, Bahia e Ceará, sendo apenas o Piauí com 60% do total das áreas queimadas. Os dados apresentados por Lins et al., (2023) indicam que a redução da cobertura vegetal nas zonas de desertificação reduziu as reservas de carbono em 56 %.

A Caatinga apresentou uma extensão média de 922 mil ha de superfície de água, com uma redução da ordem de 8,3%, entre 1985 e 2020. Apresentando extensão mínima de 630 mil ha durante a seca em 2017. As mudanças observadas em apenas no município de Caturité-PB mostrou redução de -40% em sua vegetação natural, diminuição de -51,8% em sua superfície de água, com uma média de 26 ha de área queimada por ano, entre os anos de 1985 e 2020 (Mapbioma, 2021).

Araújo Filho (2018) demonstraram que são necessários mais de 50 anos para recuperar os estoques de carbono do solo em florestas secas desmatadas da Caatinga. A redução da cobertura na região Nordeste a torna uma das áreas mais vulneráveis do Brasil à desertificação devido a secas periódicas associadas a altas taxas de desmatamento (Vieira et al., 2021). As mudanças já observadas no NEB podem ser

intensificadas pela redução da precipitação e aumento da temperatura.

Costa et al. (2018) analisaram a distribuição climática no Brasil mediante o IA, verificou o aumento da aridez principalmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. Marcos Júnior et al. (2018) também identificou maior possibilidade de aumento do clima árido no NEB para cenários futuros até o final do século. Assim, observa-se que as mudanças climáticas terão um destaque crucial para as mudanças que poderão ocorrer no NEB, principalmente em relação ao aumento da temperatura e mudança da distribuição das chuvas, com o indicativo de redução (Arias et al., 2021). Silva et al., (2023) demonstram que, mesmo com eventos extremos de chuva, a região experimenta um aumento da seca, influenciando a retirada de recursos hídricos e impactando a agricultura (De Souza Santos et al., 2024).

A intensificação da aridez no NEB pode trazer impactos significativos para o Bioma Caatinga, bioma único, existente apenas no Brasil, que ocupa 1/10 do território brasileiro, com quase sua totalidade territorial no NEB. Essa região é mais seca e quente do Brasil. Em 2020 a Caatinga apresentava cobertura de 51% corresponde a savana, 23% de pastagem e agricultura em torno de 10%, e apenas 1% do seu território estava coberto por água. Entre os anos de 1985 e 2020 na Caatinga houve redução de 10% em sua vegetação nativa e nas áreas de savana e aumento de 1456% e 48% nas áreas de agricultura e pastagens, respectivamente (Mapbioma, 2021).

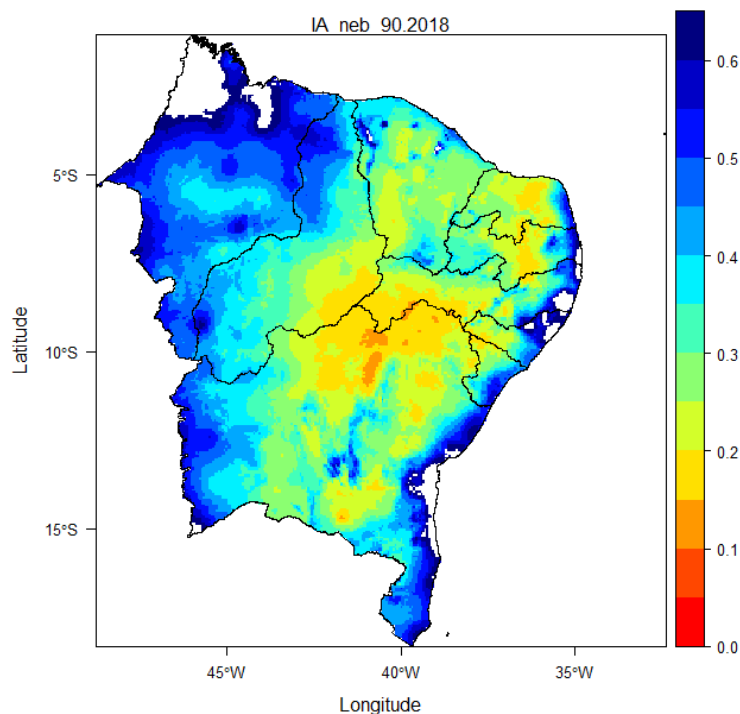


Figura 2. Distribuição espacial do índice de aridez para o Nordeste do Brasil no período baseline (1990-2018).

A fragilidade ambiental preexistente na região NEB é agravado por atividades econômicas, como a pecuária extensiva, práticas agrícolas não sustentáveis, mineração, desmatamento, características climáticas e especificidades do solo contribuem para o surgimento de cidades onde o processo de desertificação está acelerado (Macambira e Gomes, 2021). Os solos do semiárido brasileiro é sensível tanto a processos de desertificação quanto de restauração. Por outro lado, o processo de desertificação, por meio do sobrepastoreio, contribui para degradar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e alterar a estrutura, a diversidade e a composição da comunidade de impactos negativos no solo desertificados (Silva et al., 2022).

Para o cenário futuro de mudanças climáticas (2021-2040) os modelos apontam a intensificação da aridez na região central do NEB devido às mudanças climáticas (Figura 3). As mudanças no clima apontam indicativos de classificação do clima como árido e hiperárido, com suscetibilidade à desertificação muito alta e

superior a alta. As regiões críticas apontadas nesta pesquisa abrangem o norte do estado da Bahia, sudeste de Pernambuco, oeste de Piauí e parte central da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Todas essas regiões apontam para um clima árido e hiperárido, com elevada suscetibilidade à desertificação em decorrência das mudanças do clima. Essas mudanças têm o potencial de reduzir áreas com climas úmidos e subúmidos e aumentar regiões com clima semiárido e a duplicação de regiões de clima árido (Moraes et al., 2023).

A desertificação não apenas acelera a deterioração do ambiente ecológico, mas também reduz a oferta contínua de produtividade agrícola e até aumenta a gravidade e a frequência da seca, pobreza, violência e agitação política, representando uma séria ameaça ao bem-estar humano (Abuzaid e Abdelatif, 2022).

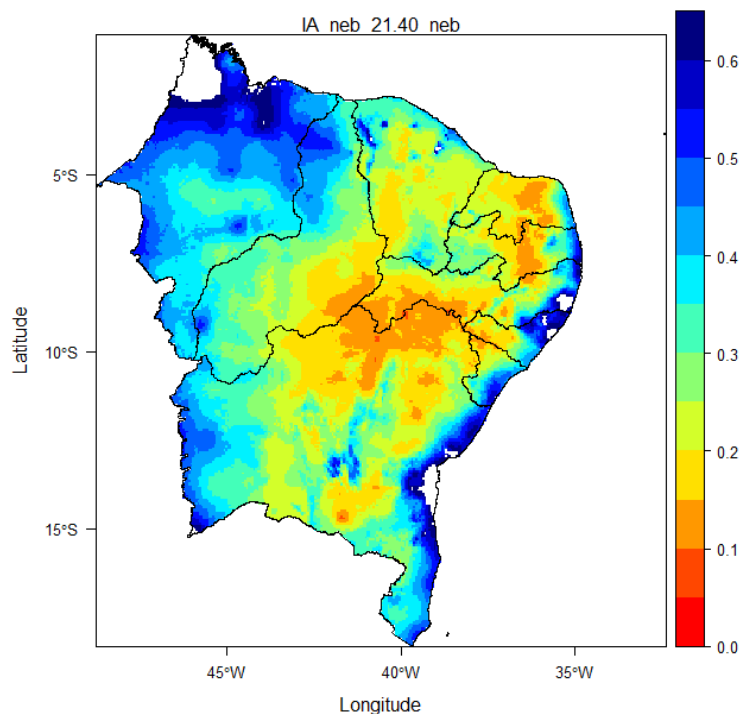


Figura 3. Distribuição espacial do índice de aridez no Nordeste do Brasil, para o cenário futuro (2021-2040) de mudanças climáticas SSP 4.5.

As regiões litorâneas não apresentam risco a desertificação, com clima subúmido e úmido, exceto o norte do estado do Rio Grande do Norte. Foi verificada uma região de transição entre a região litorânea e o interior do Nordeste, com clima subúmido seco e semiárido. Essa região apresenta suscetibilidade moderada e alta à desertificação, que com a intensificação do clima, para os cenários mais pessimistas de mudanças climáticas, podem agravar o processo de aridez do NEB.

O epicentro da desertificação do NEB é o município de Gilbués-PI, que justamente com mais 15 cidades Piauiense, possuem uma área cinco vezes maior do que a cidade de São Paulo, maior metrópole do Brasil. Gilbués juntamente com Cariris Velho-PI, Cabrobó-PE, Seridó-RN, Irauçuba-CE e Sertão do São Francisco-BA foram os núcleos de desertificação reconhecidos pelo Governo Federal e Estados. No entanto, municípios baianos como Irecê, Jeremoabo e Juazeiro apresentam desertificação em estado avançado (Macambira e Gomes, 2021). Esses municípios estão localizados nos epicentros da desertificação no NEB, regiões as quais apresentam tendências de intensificação da aridez para hiérárido, com elevada suscetibilidade a desertificação.

A degradação do solo na área de estudo está altamente relacionada ao manejo inadequado e intenso da terra que explora os recursos naturais

além da capacidade de resiliência do ecossistema. Combinando com essa evidência Tomasell et al. (2018), concluímos que a degradação do solo no NEB foi potencializada pela severa seca que afeta a região desde 2011, aumentando o desmatamento para a produção de lenha e carvão vegetal e a fração de solo nu.

Segundo Vasquez-Arroyo et al. (2020), as altas temperaturas associadas a seca que ocorreu durante a safra de 2015/2016, sobretudo no Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) causou redução de 37% até 62% comparada à máxima produtividade média já observada na região. O indicativo de aumento da suscetibilidade à desertificação na região do Matopiba pode prejudicar a produção agrícola na região devido ao aumento da necessidade de irrigação na agricultura, conforme o estudo de Santos et al. (2015).

Adicionalmente, Vieira et al. (2023) constatou que ainda que as áreas úmidas e subúmidas sejam consideradas de baixa suscetibilidade à desertificação, quando submetidas ao mau uso e manejo inadequado do solo, podem se tornar suscetíveis à desertificação. Dessa forma, as mudanças climáticas aliadas ao aumento da demanda de água configuram um desafio na gestão brasileira dos recursos hídricos e sua capacidade de suprimento.

A baixa pluviosidade, as altas taxas de evaporação e os solos frágeis da região a tornam altamente vulnerável à desertificação. Exclusão de pastagens, plantas de cobertura e terreiros estão entre as estratégias empregadas para restaurar áreas degradadas no Brasil. Essas práticas têm mostrado resultados promissores na melhoria das propriedades microbianas do solo e contribuem para a restauração de terras desertificadas (Araujo et al., 2024).

O setor energético também pode ser afetado. Segundo Fonseca et al. (2021), o semiárido brasileiro possui bons níveis de radiação ao longo do ano e, conseqüentemente, são regiões indicadas para instalação de usinas solares. Todavia, seu estudo mostrou que as tendências climáticas de elevação da temperatura média do ar resultam na redução da produção fotovoltaica por afetar o funcionamento dos módulos.

O IA em estudos de mudanças climáticas possibilita obter uma estimativa do balanço hídrico e a disponibilidade de água. O aumento das áreas semiáridas combinada com a degradação do solo pode aumentar a suscetibilidade à desertificação. Dessa forma, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que é preciso adotar medidas para reduzir a emissão de gases do efeito estufa a fim de amenizar a vulnerabilidade do sistema hídrico do país e, conseqüentemente, reduzir os conflitos de uso da água, principalmente para regiões como o NEB.

Conclusões

A pesquisa identificou para o Nordeste do Brasil apresenta predominantemente áreas suscetíveis à desertificação, sendo essas com clima semiárido. A aplicação do Índice de Aridez para o Nordeste apresenta predominância de valores abaixo de 0,40 em toda região, classificada como semiárida e alta suscetibilidade à desertificação.

As regiões mais críticas no Nordeste são as porções do interior, as quais apresentam IA inferior a 0,20. Essas regiões são classificadas como árida e suscetibilidade à desertificação muito alta. As regiões litorâneas apresentam porções classificadas como subúmida seca e moderada e pequenas porções não suscetível à desertificação.

A projeção futura para o cenário de mudanças climáticas indica intensificação da aridez, com indicativos de classificação do clima árido e hiperárido. Essa classificação impõe ao Nordeste alta e muito alta suscetibilidade à desertificação, se as mudanças climáticas em cursos se confirmarem.

A região Nordeste, predominantemente semiárida, é a região com menor disponibilidade hídrica do país (Rodrigues e Batistela, 2013). O aumento das áreas semiáridas combinado com a degradação do solo pode aumentar a suscetibilidade à desertificação, reduzindo a disponibilidade hídrica e possivelmente aumentando ainda mais os conflitos pelo uso da água.

Embora o Brasil apresente grande disponibilidade de água, essa capacidade está distribuída de forma distinta pelo território (ANA, 2019). Além das suas dimensões continentais e diversidade climática, a garantia hídrica vem sendo ameaçada devido ao crescimento populacional aliado a degradação dos recursos naturais (ANA, 2010). O uso do IA em projeções de mudanças climáticas possibilita obter uma estimativa do balanço hídrico e a disponibilidade de água (Marengo e Bernasconi, 2015).

De acordo com Moraes et al., (2022), há indícios de aumento de áreas áridas e semiáridas e redução significativa de áreas não suscetíveis à desertificação no NEB para cenários futuros de mudanças climáticas. Também há previsão para as regiões semiáridas de aumento de temperatura e redução de chuvas, com aumento de chuvas extremas e frequência de dias secos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGPDS.

Referências

- Al-Kulabi, A. K. J. (2022). The Concept of Desertification, Its Causes and Effects, and Treatments. *Journal La Lifesci*, 3(1), 1-13. <https://doi.org/10.37899/journallalifesci.v3i1.550>
- Araujo, A. S. F., de Medeiros, E. V., da Costa, D. P., de Araujo Pereira, A. P., & Mendes, L. W. (2024). From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties. *Journal of Environmental Management*, 351, 119746. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746>
- Araujo Filho, R. N., dos Santos Freire, M. B. G., Wilcox, B. P., West, J. B., Freire, F. J., & Marques, F. A. (2018). Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. *Forest Ecology and Management*, 407, 210-

- 220.<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., ... & Zickfeld, K., 2021. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary. 2021.
- Al Makky, A., Alaswad, A., Gibson, D., Song, S., Olabi, A. G., 2018. A numerical and experimental study of a new design of closed dynamic respiration chamber. *Computers and Electronics in Agriculture* 145, 326-340. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.015>.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alvalá, R., Cunha, A. P., Brito, S. S., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L., & Carvalho, M. A. (2017). Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2019. Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil / Agência Nacional de Águas. Brasília.
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2010. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: Panorama Nacional. Brasília.
- Abuzaid, A. S., & Abdelatif, A. D. (2022). Assessment of desertification using modified MEDALUS model in the north Nile Delta, Egypt. *Geoderma*, 405, 115400. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115400>
- Barreto, L. L. Suscetibilidade ao processo de desertificação no núcleo dos Sertões dos Inhamuns: O caso da sub-bacia do riacho do Urubu – Mucuí – Arneiroz – CE. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação de Geografia, Fortaleza, 2015.
- Barros, K. de O. Índice de aridez como indicador da susceptibilidade à desertificação na mesorregião norte de Minas, 2010. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Geografia). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010.
- Bodas Terassi, P. M., & Tommaselli, J. T. G., 2016. Avaliação de sistemas de classificação climática para a vertente paranaense da bacia hidrográfica do rio Itararé. *Caderno de Geografia*, 26(47), 877-896. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26n47p877>.
- Brasil. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca: PAN BRASIL. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/ Secretaria de Recursos Hídricos, 214 p., 2004.
- CGEE. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil, 2016. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Ed: Brasília.
- Costa, J. M., Marcos Junior, A. D., Silveira, C. D. S., & Vasconcelos Júnior, F. D. C., 2018. Influência das mudanças climáticas, projetadas pelo IPCC, na aridez do Brasil. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 11(3), 429-442.
- CRU-TS. Climatic Research Unit gridded Time Series. Disponível em: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Acesso em: 04 abr. 2020.
- Dessa, U. R. B.; Pipper, C. B. "R"--project for statistical computing. *Ugeskrift for laeger*, v. 170, n. 5, p. 328-330, 2008.
- De Souza Santos, J. A., Wanderley, H. S., de Amorim, R. F. C., Delgado, R. C., & Fernandes, R. C. (2024). The longest multiannual drought in Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104976>
- Dourado, C. S., 2017. Áreas de risco de desertificação: cenários atuais e futuros frente às mudanças climáticas. 2017. 141 f (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil).
- Elnashar, A., Zeng, H., Wu, B., Gebremicael, T. G., & Marie, K. (2022). Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile Basin driven by the MEDALUS-GEE framework. *Science of The Total Environment*, 815, 152925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152925>
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME).

- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020. Relatório Síntese / Ano base 2019. Rio de Janeiro.
- Fernandes, R. D. O., Silveira, C. D. S., Studart, T. M. D. C., & Souza, F. D. A. D., 2017. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. *RBRH*, 22.
- Fonseca, L. F. S., Silva Júnior, J. M., Farias Neto, J. R., Abrahão, R., & Carvalho, M., 2021. Vulnerability of semiarid regions to climate change: impacts on the production of photovoltaic energy. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.12931>. Acesso em: 22 dez 2021.
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11980500>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. IBGE | Portal do IBGE | IBGE. Acesso em: 29 jun 2023.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Lins, C. M. T., de Souza, E. R., dos Santos Souza, T. E. M., Paulino, M. K. S. S., Monteiro, D. R., de Souza Júnior, V. S., ... & Schaffer, B. (2023). Influence of vegetation cover and rainfall intensity on soil attributes in an area undergoing desertification in Brazil. *Catena*, 221, 106751. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106751>
- 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>
- Macambira, D., & Alcobaça Gomes, J. M., 2021. Desertificação em gilbués-piauí sob a ótica da história ambiental. *Historia: Questões & Debates*, 69(2):. <http://dx.doi.org/10.5380/his.v00i0.000000>
- MapBiomias – Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra na Caatinga - Coleção 6. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/MAPBiomias_CAATI_NGA_06102010_OK-v2.pdf. Acesso em: 20 dez 2021.
- Marcos Junior, A. D., Da Silva Silveira, C., Das Chagas Vasconcelos Júnior, F., Guimarães, S. O., & Da Costa, J. M. F., 2018. Classificação climática de Thornthwaite para o Brasil com base em cenários de mudanças climáticas do IPCC-AR5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 647-664. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334007>
- Marengo, J. A., & Bernasconi, M., 2015. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, 129(1-2), 103-115. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>
- Matallo Junior, H., 2009. Glossário de termos e conceitos usados no contexto da UNCCD.
- Mirzabaev, A., J. Wu, J. Evans, F. García-Oliva, I.A.G. Hussein, M.H. Iqbal, J. Kimutai, T. Knowles, F. Meza, D. Nedjraoui, F. Tena, M. Türkeş, R.J. Vázquez, M. Weltz, 2019: Desertification. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Moraes, J. B., Wanderley, H. S., & Delgado, R. C., 2023. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. *Natural Hazards*, 116(2), 1463-1483. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05724-x>
- Penman, H. L., 1952. The physical bases of irrigation control. In Report of the 13th international horticultural congress (pp. 913-924).
- Pereira, G., Silva, M. E. S., Moraes, E. C., & Cardozo, F. D. S., 2013. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 139-148.
- Rêgo, A. D., 2012. Os sertões e os desertos: o combate à desertificação e a política externa brasileira. Brasília: Funag.

- Rodrigues, S. A., & Batistela, G. C. (2013). Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica?. *Geoambiente on-line*, (21). Acesso em: 15 jan 2023.
- Rolim, G. D. S., Camargo, M. B. P. D., Lania, D. G., & Moraes, J. F. L. D., 2007. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia*, 66, 711-720. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022>.
- Oliveira Santana, M., 2007. Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil.
- Santos, C. A. C. D., Brito, J. I. B. D., Rao, T. V. R., & Menezes, H. E. A., 2009. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 39-47. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100004>
- Santos, D. N. D., da Silva, V. D. P., Sousa, F. D. A., & Silva, R. A., 2010. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 492-500. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000500006>
- Santos, S. M., Leal, B. G., & Taura, T. A., 2015. Determinação da suscetibilidade climática à desertificação para os municípios baianos de juazeiro, casa nova, sobradinho e curaçá. Sistema web para visualização de informações geográficas de áreas com suscetibilidade climática à desertificação, 26.
- Schenkel, C. S. & Matallo Júnior, H., 1999. Desertificação. Brasília: UNESCO.
- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H., & Barbosa, P., 2015. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2210-2222. <https://doi.org/10.1002/joc.4124>
- Silva, B. F., dos Santos Rodrigues, R. Z., Heiskanen, J., Abera, T. A., Gasparetto, S. C., Biase, A. G., ... & de Camargo, P. B. (2023). Evaluating the temporal patterns of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. *Ecological Informatics*, 77, 102192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102192>
- Silva, D. F., Moreira, J. V., de Sousa, L. I. S., Santana, M. C., Mota, J. C. A., dos Santos Queiroz, A., ... & de Araujo Pereira, A. P. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi community in soils under desertification and restoration in the Brazilian semiarid. *Microbiological Research*, 264, 127161. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127161>
- Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tomasella, J., Vieira, R. M. S. P., Barbosa, A. A., Rodriguez, D. A., de Oliveira Santana, M., & Sestini, M. F. (2018). Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>
- UNCCD, 1994. United Nations Convention to Combat Desertification, Intergovernmental Negotiating Committee for a Convention to Combat Desertification, Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. U.N. Doc. A/AC.241/27, 33 I.L.M. 1328. New York, United Nations.
- UNEP. World Atlas of Desertification, 1992. Edward Arnold, London, 69p.
- Vasquez-Arroyoa, E., da Silvab, F., Santosc, A., Cordeirod, D., Marengoe, J. A., & Lucenaf, A. F., 2020. Impactos climáticos na segurança energética no Brasil: análise de eventos observados e opções de adaptação. *Sustabilidade em debate*. Brasília, v. 11, n.3, p. 177-196. doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33838
- Vieira, R. M. D., Tomasella, J., Barbosa, A. A., Martins, M. A., Rodriguez, D. A., Rezende, F. S., ... & Santana, M. D. (2021). Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. *Land Degradation & Development*, 32(1), 224-240. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>
- Wu, Z., Xu, H., Li, Y., Wen, L., Li, J., Lu, G., & Li, X., 2018. Climate and drought risk regionalisation in China based on probabilistic aridity and drought index. *Science of the Total Environment*, 612, 513-521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.078>
- Zhao, T., and A. Dai, 2015: The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario. *J. Clim.*, 28, 4490–4512, doi:10.1175/JCLI-D-14-00363.1.