



INFLUÊNCIA HUMANA E CLIMÁTICA NA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE UMA PAISAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

DE ALMEIDA, Gabriela Macêdo Aretakis¹; ALMEIDA NETO, Miguel Santana de²; DE ALMEIDA, Carolina Alves Collier³; DE OLIVEIRA, Tiago Henrique⁴; PIMENTEL, Rejane Magalhães de Mendonça⁵

RESUMO

As paisagens são construídas ao longo do tempo por meio da interação entre fatores climáticos e influências humanas. Este estudo objetivou avaliar a dinâmica espaço-temporal em uma paisagem de Caatinga no semiárido brasileiro, considerando as influências humanas e climáticas. Para análise da dinâmica espaço-temporal da paisagem, foram utilizadas imagens de satélite entre os anos 1990 e 2014, nas quais foram realizadas análises de uso e cobertura da terra, e calculados o Índice de Vegetação Ajustado, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, o Índice de Área Foliar e o Índice de Umidade. Na análise das mudanças da área de vegetação, foram utilizados dados de precipitação. Ao analisar as classes de uso e cobertura da terra, a Área Urbana apresentou crescimento ao longo de todos os anos estudados. Já a Área Rural mostrou uma diminuição de 1990 para 1995. Os índices mostraram um padrão semelhante para a distribuição das classes entre os anos, com exceção de 1990. O fenômeno *El Niño*, iniciado na década de 1990, parece ter modificado a pluviometria da região, influenciando os índices de vegetação. Os achados desta pesquisa evidenciam o papel das pessoas e do clima como dirigentes de modificações nas paisagens.

Palavras-chave: IVA; IVAS; IAF; NDWI.

HUMAN AND CLIMATE INFLUENCE ON THE SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF A LANDSCAPE IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID

ABSTRACT

Landscapes are constructed over time through the interaction between climatic factors and human influences. This study aimed to evaluate the spatial and temporal dynamics of a Caatinga landscape in the Brazilian semiarid region, considering both human and climatic influences. To analyze the spatial and temporal dynamics of the landscape, satellite images from 1990 to 2014 were used. These images were analyzed for land use and land cover, and the Enhanced Vegetation Index, Soil Adjusted Vegetation Index, Leaf Area Index and Normalized Difference Water Index were calculated. Precipitation data were used to analyze changes in vegetation area. When analyzing land use and land cover classes, the Urban Area showed growth throughout all the years studied. The Rural Area, however, showed a decrease from 1990 to 1995. The indices showed a similar pattern for the distribution of classes between the years, with the exception of 1990. The *El Niño* phenomenon, which began in the 1990s, appears to have altered the region's rainfall, influencing vegetation indices. The findings of this research highlight the role of people and climate as drivers of landscape changes.

Keywords: EVI; SAVI; LAI; NDWI.

¹ Doutora, UNEB, Docente. E-mail: gmalmeida@uneb.br. Registro ORCID: [0000-0003-3455-993X](https://orcid.org/0000-0003-3455-993X).

² Doutor, IFsertão-PE, Docente. E-mail: miguel.almeida@ifsertao-pe.edu.br. Registro ORCID: [0000-0002-4999-4910](https://orcid.org/0000-0002-4999-4910).

³ Doutora. E-mail: carolinaalvescollierdealmeida@gmail.com. Registro ORCID: [0000-0002-5268-4542](https://orcid.org/0000-0002-5268-4542).

⁴ Doutor. E-mail: thdoliveira50@gmail.com. Registro ORCID: [0000-0002-7206-3372](https://orcid.org/0000-0002-7206-3372).

⁵ Doutora, UFRPE, Docente. E-mail: rejanemmpimentel@gmail.com. Registro ORCID: [0000-0003-3211-7601](https://orcid.org/0000-0003-3211-7601).

1. INTRODUÇÃO

As paisagens distribuídas no planeta são construídas ao longo do tempo por meio da interação entre diversos fatores climáticos e influências humanas. Estimativas calculam que, aproximadamente, 50% da cobertura terrestre do planeta foi submetida a impactos resultantes da interação entre as pessoas e o ambiente (HOOKE et al., 2012). A configuração atual da paisagem em diversas regiões do mundo é resultado das modificações decorrentes do processo de domesticação, que vem sendo realizado a milhares de anos por grupos humanos (CASAS et al., 1997). No processo de domesticação, as paisagens são construídas por meio da interação entre as pessoas e o ambiente, sendo manipuladas e moldadas ao longo do tempo de acordo com as necessidades humanas (CLEMÉNT et al., 2015).

Durante a trajetória humana no planeta, uma das modificações diretas mais evidentes nas paisagens realizadas até hoje é a substituição de áreas florestadas por áreas não florestadas. Essa substituição causa impactos imediatos sobre a vegetação e pode prejudicar de modo irreversível os processos ecológicos do ecossistema (ZIPPERER et al., 2012; SILVA, 2023). Além disso, tais mudanças podem trazer diversos prejuízos à qualidade de vida das pessoas, uma vez que se reconhece que a substituição de áreas florestadas por áreas impermeabilizadas pode influenciar fenômenos como enchentes ou alagamentos, além da formação de ilhas de calor em áreas urbanas (SHAMS et al., 2009; SILVA, 2023). Todas essas mudanças podem acelerar processos naturais e promover alterações climáticas em nível local, regional, e até mesmo global, sendo necessários estudos para avaliar suas consequências.

Diversos aspectos relacionados aos padrões de mudança espaço-temporal da paisagem têm sido melhor compreendidos através do uso de geotecnologias, como o sensoriamento remoto integrado à Sistema de Informações Geográficas (SIG) (e.g. WILLKOMM et al., 2016; FARIAS e PEREIRA, 2024). Nestes estudos são obtidas medidas acuradas de parâmetros climáticos e da vegetação através de índices calculados a partir da energia refletida pelos objetos dispostos na superfície terrestre.

Os índices de vegetação, como o Índice de Vegetação Ajustado (EVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Umidade (NDWI), têm se mostrado relevantes para avaliação de mudanças climáticas e espaço temporais nas paisagens (e.g. SANTANA et al., 2016; SILVA et al., 2020). A utilização desses índices possibilita uma análise qualitativa e quantitativa da paisagem, agregando informações essenciais para estudos de monitoramento e predição de suas condições futuras. Investigações dessa natureza auxiliam no

desenvolvimento de planos de manejo e conservação de ecossistemas susceptíveis a problemas ambientais decorrentes de alterações climáticas e ações humanas.

Em regiões semiáridas, como a área de vegetação de Caatinga no Brasil, ocorrem espécies endêmicas com adaptações singulares às condições adversas encontradas no ambiente, como a elevada luminosidade e baixa precipitação. Aproximadamente 80% deste bioma foi impactado pela expansão agropecuária, exploração de recursos naturais e crescimento urbano (MMA, 2024). No entanto, as modificações na cobertura vegetal da paisagem de caatinga também são influenciadas por fenômenos climáticos, que ocasionam mudanças na precipitação e na reflectância da luz. Esta realidade desperta o interesse de pesquisadores na realização de estudos voltados para a compreensão da sua dinâmica, uma vez que tais modificações podem ser resultado de ações humanas diretas, como também da variação interanual da cobertura vegetal, em função das mudanças climáticas. Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a dinâmica espaço-temporal em uma paisagem de Caatinga no semiárido brasileiro, considerando as influências humanas e climáticas. Estudos como o proposto pretendem revelar como as atividades humanas e fatores climáticos podem atuar na construção de paisagens, influenciando sua configuração e trazendo bases e apontamentos para pesquisa de modelagem e projeções futuras. Com tais projeções podem ser tomadas medidas preventivas e mitigadoras de problemas revelados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

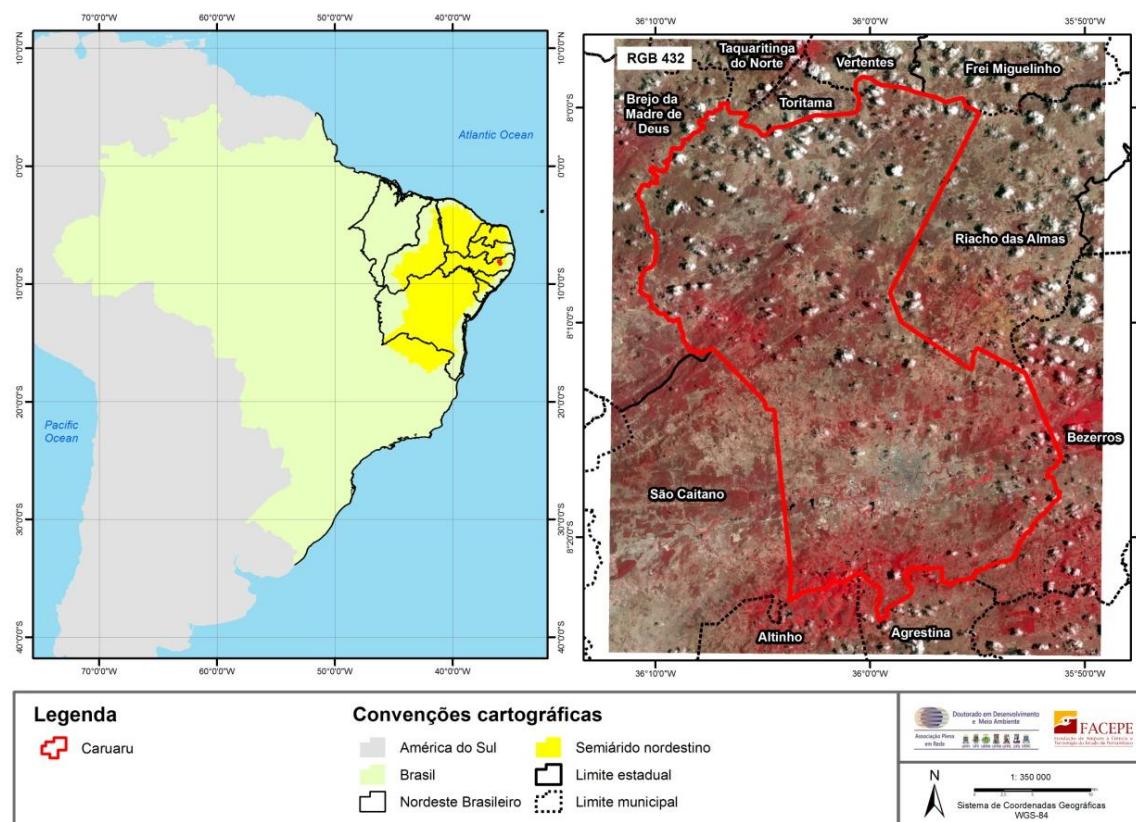
2.1. ÁREA DE ESTUDO

A paisagem selecionada para o estudo está inserida no semiárido brasileiro, e tem como vegetação típica predominante a caatinga. O bioma Caatinga apresenta-se como um mosaico de florestas sazonalmente secas que se estende ao longo de 862.818 km² (LEAL et al., 2005, MMA, 2024). Sua área de abrangência inclui os Estados nordestinos Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí e Sergipe, e no sudeste do país pode ser encontrado na parte norte do Estado de Minas Gerais (MMA, 2024). A vegetação típica de caatinga compreende espécies lenhosas com espinhos, além de espécies de bromélias e cactáceas (PRADO, 2003), geralmente distribuídas de modo esparsos.

O recorte da paisagem selecionado corresponde ao município Caruaru, no Agreste de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 1). O clima da região é do tipo semiárido (Bsh), apresentando

verões marcados por seca e calor, e invernos com chuvas e temperaturas mais brandas (ALVARES et al., 2014). A precipitação média anual em Caruaru é de 484 mm (SARA, 2015) e a temperatura média é 22,9°C, com a temperatura máxima podendo atingir 28°C e a temperatura mínima anual 19°C (MEDEIROS et al., 2021).

Figura 1 – Localização da área de estudo no Brasil e detalhe da paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil.



Fonte: Os autores (2025).

A cidade de Caruaru ocupa uma área de 923,150 km², com uma população aproximada de 378.048 habitantes (IBGE, 2022). Historicamente, Caruaru começou a se formar em 1681, quando o então governador de Pernambuco Aires de Souza de Castro fez uma concessão de terras à família Rodrigues de Sá para o desenvolvimento de atividades agropecuárias (IBGE, 2024). Com o passar dos anos, foi se formando um povoado ao redor da “Fazenda Caruaru”. Em 1857, o então povoado de Caruaru foi promovido à cidade, tornando-se uma das primeiras cidades do Agreste pernambucano (IBGE, 2024).

Caruaru é considerado um importante polo econômico e cultural para o nordeste brasileiro. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO, 2014), o Alto do Moura, localizado no município, é considerado o maior centro de artes figurativas da América Latina. As principais fontes de renda para a zona urbana são o comércio, a indústria e o turismo (MESQUITA e ANDRADE, 2006), e na zona rural são desenvolvidas atividades ligadas à agropecuária.

A cidade de Caruaru ocupa uma área de 923,150 km², com uma população aproximada de 378.048 habitantes (IBGE, 2022). Historicamente, Caruaru começou a se formar em 1681, quando o então governador de Pernambuco Aires de Souza de Castro fez uma concessão de terras à família Rodrigues de Sá para o desenvolvimento de atividades agropecuárias (IBGE, 2024). Com o passar dos anos, foi se formando um povoado ao redor da “Fazenda Caruaru”. Em 1857, o então povoado de Caruaru foi promovido à cidade, tornando-se uma das primeiras cidades do Agreste pernambucano (IBGE, 2024).

Caruaru é considerado um importante polo econômico e cultural para o nordeste brasileiro. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO, 2014), o Alto do Moura, localizado no município, é considerado o maior centro de artes figurativas da América Latina. As principais fontes de renda para a zona urbana são o comércio, a indústria e o turismo (MESQUITA e ANDRADE, 2006), e na zona rural são desenvolvidas atividades ligadas à agropecuária.

2.2 LEVANTAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para analisar a dinâmica espaço-temporal da paisagem, foi realizada a seleção e aquisição de imagens de satélite, com base na disponibilidade de imagens com menor cobertura de nuvens para a área em estudo desde as primeiras imagens captadas pelos satélites *LANDSAT* até o ano de 2024. As imagens selecionadas foram as datadas em 23 de março de 1990, 22 de abril de 1995 e 07 de abril de 2007, no sensor TM (*Thematic Mapper*), a bordo do satélite *LANDSAT-5*, e de 26 de abril de 2014 no sensor OLI (*Operational Land Imager*), a bordo do satélite *LANDSAT-8*. A obtenção de uma imagem de outro sensor e satélite, o *LANDSAT-8*, se deu devido ao satélite *LANDSAT-5* ter apresentado falhas e ter parado de realizar imageamento a partir de 2012. Não foram encontradas imagens mais recentes com baixa cobertura de nuvens. As imagens da órbita e ponto 214/66, apresentam resolução espacial de 30 metros nas faixas do visível (azul, verde e vermelho), infravermelho próximo e infravermelho

médio. Essas imagens são disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e pela United State Geological Survey (USGS).

Com as imagens obtidas foi realizada a classificação do uso e cobertura da terra na área de estudo, além da obtenção dos índices de vegetação.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA

Para analisar as mudanças espaciais e temporais e identificar a influência humana na distribuição geral dos tipos de uso e cobertura da terra, foi realizada uma classificação não supervisionada nas imagens obtidas. Como classificador foi utilizado o algoritmo ISODATA, onde os pixels são analisados de forma isolada, sendo agrupados de acordo com os intervalos de níveis de cinza aproximados (JENSEN, 1996). Nesta classificação foram delimitadas quatro classes principais: Área Urbana, que inclui o núcleo urbano de Caruaru com suas áreas construídas; Área Rural, locais com ausência de elementos urbanos, com predominância de vegetação rasteira; Solo exposto, área com predominância de solo exposto; e Vegetação de Caatinga, área com predominância de vegetação de caatinga.

As imagens utilizadas para a classificação não supervisionada foram as de reflectância na composição RGB 432 e 543 para os satélites *LANDSAT-5* e *LANDSAT-8*, respectivamente. Após a classificação, foram gerados os mapas na plataforma ESRI do software ArcGIS, na versão 9.3.

2.4 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Para analisar a dinâmica da cobertura vegetal na paisagem estudada em função da radiação, foram utilizados o Índice de Vegetação Ajustado (IVA) (*EVI – Enhanced Vegetation Index*), o Índice de Vegetação Ajustado ao solo (IVAS) (*SAVI - Soil Adjusted Vegetation Index*), o Índice de Área Foliar (IAF) (*LAI – Leaf Area Index*) e o Índice de Umidade (*NDWI - Normalized Difference Water Index*). Para o cálculo desses índices, inicialmente foram obtidas a radiância e reflectância espectral nas imagens *LANDSAT*. A radiância representa a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida em nível do satélite nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, com aplicação da equação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND$$

Onde: a representa a radiância espectral mínima, b a radiância espectral máxima, ND a intensidade do pixel, e i representa as bandas do satélite *LANDSAT-5*.

Para a imagem do *LANDSAT-8* foi utilizada a equação proposta pela USGS (2017):

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

Onde: L_λ = radiância espectral no topo da atmosfera (Watts/(m²sradμm)), M_L = fator de reescalonamento multiplicativo específico da banda a partir dos metadados (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, onde x é o número da banda), Q_{cal} = padrão de valores de pixel quantificados e calibrados e A_L = fator de reescalonamento aditivo específico de banda a partir dos metadados (*RADIANCE_ADD_BAND_x*, onde x é o número da banda).

A reflectância espectral é a razão entre o fluxo de radiação refletida pela superfície e o fluxo de radiação global incidente, calculada por meio da equação proposta por Allen et al. (2002):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r}$$

Onde: $L_{\lambda i}$ representa a radiância espectral de cada banda i do satélite *LANDSAT-5*, $K_{\lambda i}$ representa a irradiação espectral de cada banda i no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar, e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em um determinado dia do ano.

Para a imagem do *LANDSAT-8* o cálculo da reflectância foi realizado por meio equação desenvolvida pela USGS (2017):

$$\rho\lambda' = M_\rho Q_{cal} + A_\rho$$

Onde: $\rho\lambda'$ = radiância spectral no topo da atmosfera, sem correção do ângulo solar, M_ρ = fator de reescalonamento multiplicativo específico para cada banda a partir dos metadados específicos (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, onde x é o número da banda), Q_{cal} = padrão de valores de pixel quantificados e calibrados e A_ρ = fator de reescalonamento aditivo específico de banda a partir dos metadados (*RADIANCE_ADD_BAND_x*, onde x é o número da banda).

Após o cálculo de radiância e reflectância espectral, foi utilizada para o cálculo do EVI a equação proposta por Huete et al. (1997):

$$EVI = G \frac{\rho_{IVP} - \rho_{Ver}}{L + \rho_{IVP} + C_1 \rho_{Ver} + C_2 \rho_{azul}}$$

Onde: G representa o fator de ganho (2,5) ρ_{IVP} representa a reflectância no infravermelho próximo, ρ_{Ver} é a reflectância no vermelho, ρ_{azul} é a reflectância no azul, C_1 representa o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (valor igual a 6), C_2 o coeficiente de correção dos

efeitos atmosféricos para o azul (valor igual a 7,5), e L representa o fator de correção para interferências do solo (FORMIGONI et al. 2011).

Para o cálculo do SAVI foi utilizada a equação proposta por Huete et al. (1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)}$$

Onde: L é uma constante de ajuste, sendo aqui utilizado L = 0,3, ρ_{IV} representa a reflectância no infravermelho próximo, e ρ_V representa a reflectância no vermelho.

No cálculo do Índice de Área Foliar (IAF), foi utilizada a equação proposta por Allen et al. (2002):

$$LAI = \frac{-\ln \left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59} \right)}{0.91}$$

O cálculo do Índice de umidade (NDWI) foi realizado por meio da equação desenvolvida por Gao (1996):

$$NDWI = \frac{\rho_{IV} - \rho_{NIR}}{\rho_{IV} + \rho_{NIR}}$$

Onde: ρ_{IV} corresponde à do infravermelho próximo e ρ_{NIR} à banda do infravermelho médio do *LANDSAT-5* e 8.

Esses índices foram utilizados para avaliar as modificações espaciais e temporais da área vegetada na paisagem em estudo. O tratamento e análise desse conjunto de dados foram conduzidos no programa Erdas 9.3.

2.5 OBTENÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Na análise das mudanças da área de vegetação, foram utilizados dados de precipitação do posto Caruaru (IPA), código 24, referentes ao período entre 1989 e 2014, disponíveis no site da Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC, 2016). Considerando a marcante sazonalidade das chuvas, característica do semiárido brasileiro, foram utilizados os dados do acumulado da pluviometria dos três meses anteriores aos meses de obtenção das imagens utilizadas na análise de uso e cobertura da terra. Com os dados de precipitação do acumulado dos três meses chuvosos entre 1989 e 2014 e da área ocupada pela vegetação (km^2) nos anos de 1990, 1995, 2007 e 2014, foi construído um gráfico em função da área ocupada pela vegetação (km^2).

3. RESULTADOS

3.1 DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL NO USO E COBERTURA DA TERRA

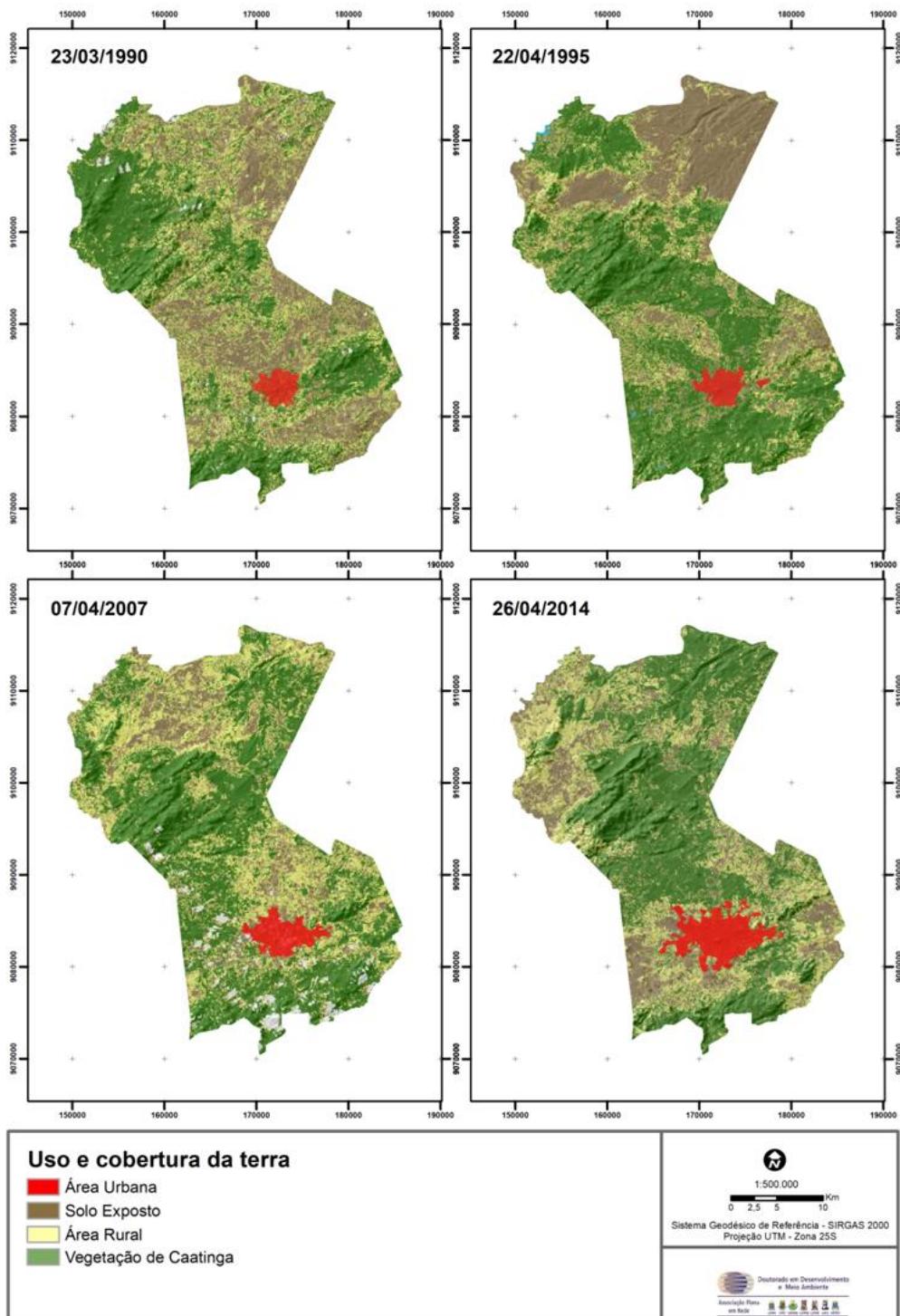
Ao analisar as classes de uso e cobertura da terra, a Área Urbana apresentou crescimento ao longo de todos os anos estudados, com um aumento de mais de três vezes em sua extensão, variando de 13,81 km² em 1990 para 44,31 km² em 2014 (Tabela 1). A Área Rural mostrou um padrão distinto do observado na Área Urbana (Figura 2), apresentando inicialmente uma diminuição do ano de 1990 para 1995 (Tabela 1). No entanto, posteriormente foi evidenciado um crescimento de 63% desta área de 1995 para 2007, seguida de uma redução, atingindo 280,60 km² em 2014 (Tabela 1). Na área de Solo Exposto foram encontrados valores próximos para os anos de 1990 e 1995, havendo uma redução de aproximadamente 50% em sua extensão do ano de 1995 para 2007 (Tabela 1). Nos anos de 1995 e 2007, observou-se o aumento da Área Rural e a diminuição de Solo Exposto, em semelhante proporção. Em 2007 e 2014 houve um aumento de 25% na extensão do Solo Exposto (Tabela 1, Figura 2). Na área florestada analisada, a classe de Vegetação de Caatinga mostrou uma diferença pouco expressiva entre os últimos anos (Tabela 1, Figura 2). Apenas o ano de 1990 apresentou valores percentuais mais próximos de 40% de cobertura da área total avaliada, as demais décadas mostraram valores mais próximos a 50% (Tabela 1, Figura 2).

Tabela 1 - Distribuição das classes de uso e cobertura da terra para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, correspondendo aos anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.

Anos	Extensão da área em km ²			
	Área Urbana	Área Rural	Solo Exposto	Vegetação de Caatinga
1990	13,81	255,63	284,48	374,47
1995	16,05	172,19	283,03	464,63
2007	24,90	288,35	143,03	459,88
2014	44,31	280,60	178,58	463,08

Fonte: Os autores (2025).

Figura 2 - Mapas de uso e cobertura da terra para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.

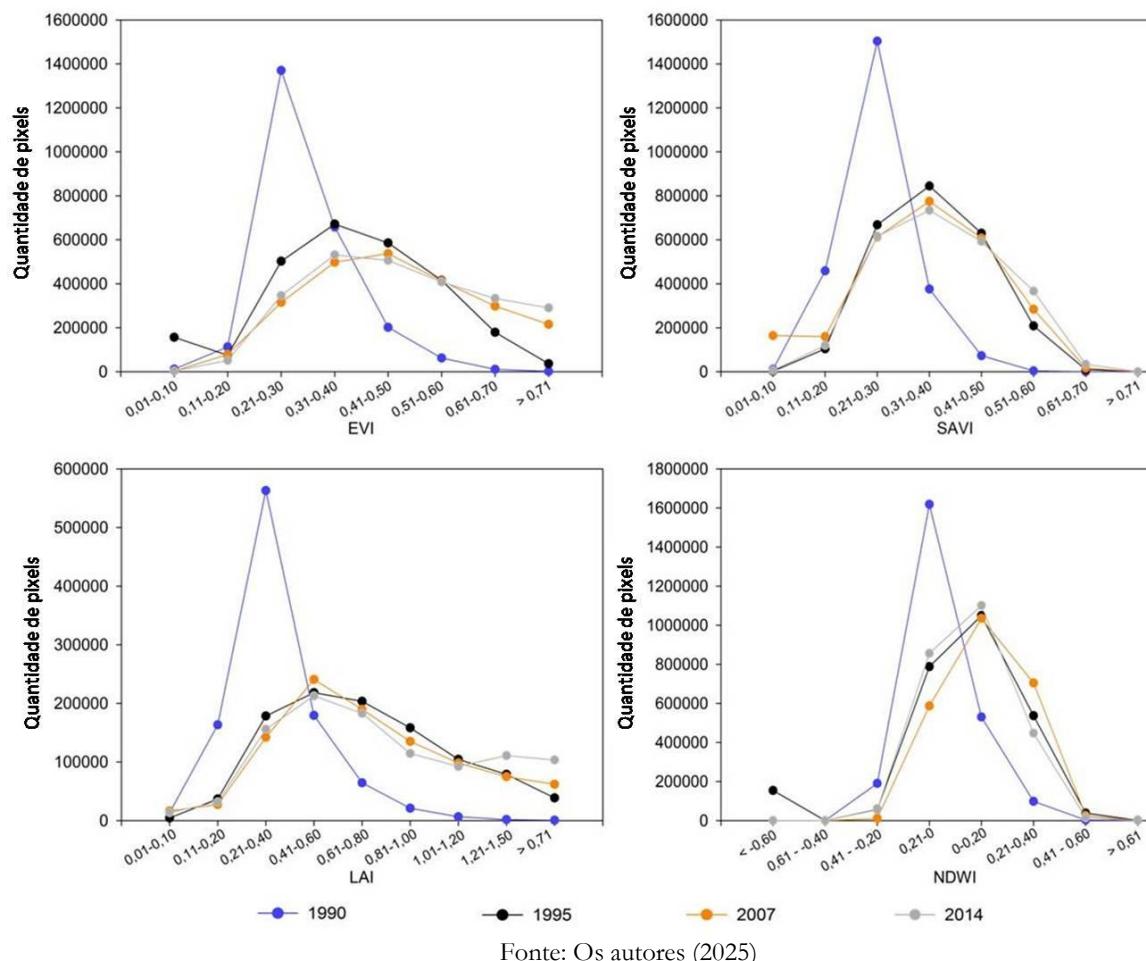


Fonte: Os autores (2025)

3.2 DINÂMICA DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

O Índice de Vegetação Ajustado (EVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao solo (SAVI), o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Umidade (NDWI) mostraram um padrão semelhante para a distribuição das classes entre os anos estudados, com exceção de 1990 (Figura 3).

Figura 3 - Distribuição das classes do Índice de Vegetação Ajustado (EVI), do Índice de Vegetação Ajustado ao solo (SAVI), do Índice de Área Foliar (IAF) e do Índice de Umidade (NDWI) para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.

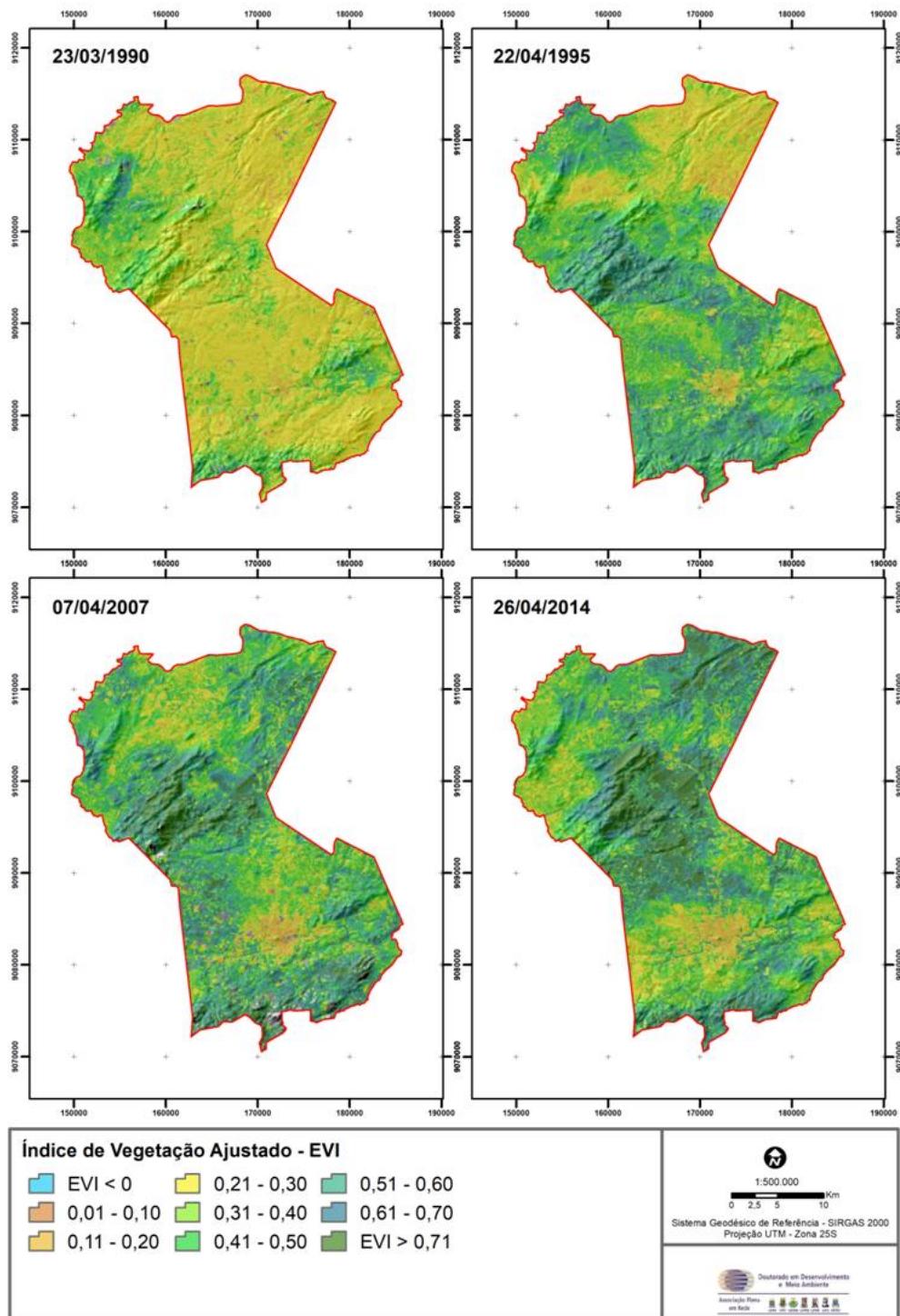


Fonte: Os autores (2025)

Na avaliação do Índice de Vegetação Ajustado (EVI) foi identificada na imagem de 1990 a maior quantidade de pixels na classe 0,21-0,30, enquanto nos demais anos, os maiores valores se encontram entre 0,31-0,50 (Figuras 4 e 5). Os valores de EVI na classe 0,21-0,30 estão relacionados à presença de solo exposto e vegetação seca, e os valores entre 0,101-0,20 estão relacionados com a área urbana e com a presença de solo exposto. As áreas de vegetação se enquadram em classes com valores

acima de 0,31. As serras e áreas de maior elevação apresentaram valores de EVI superiores a 0,40 em todas as imagens avaliadas.

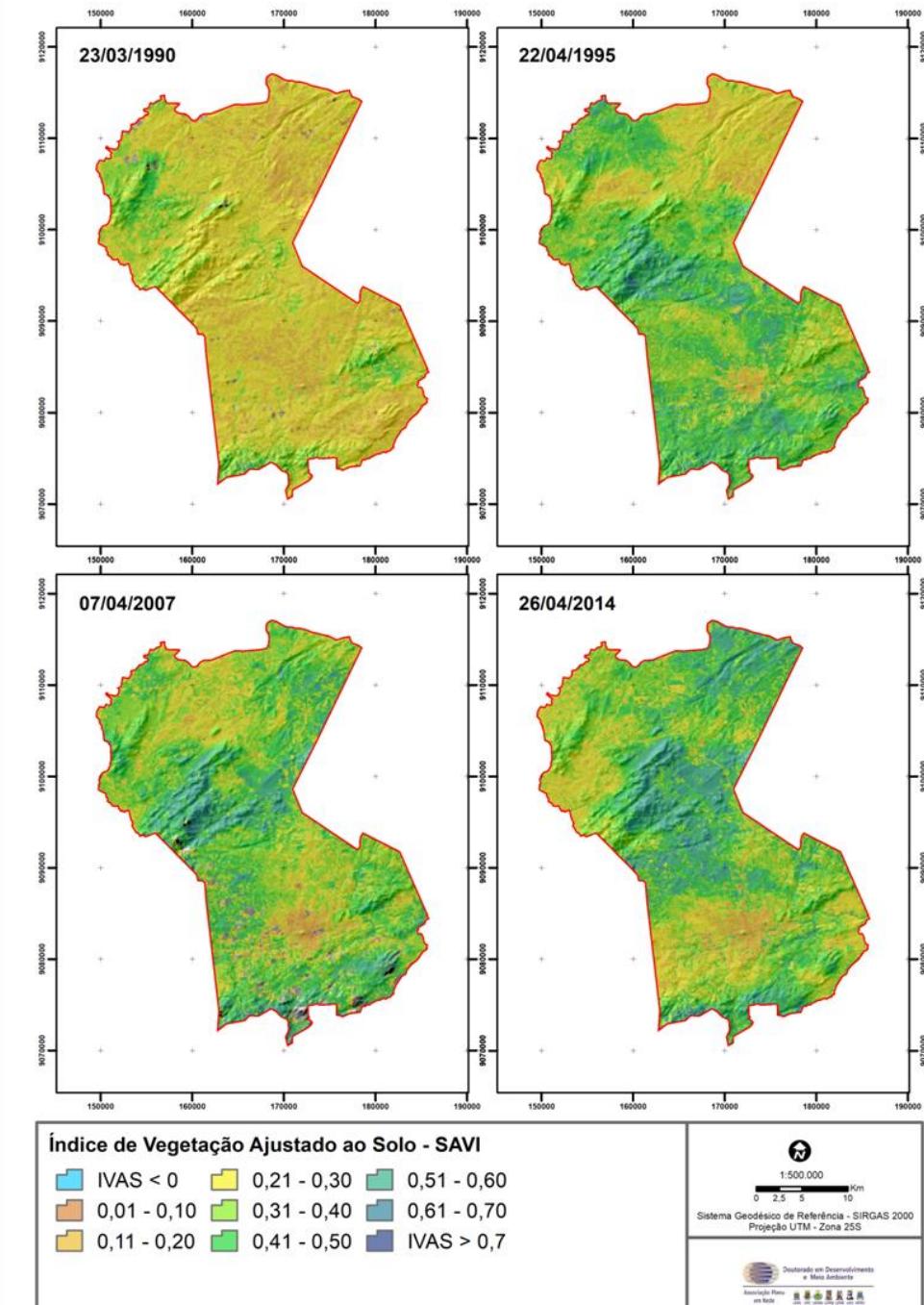
Figura 4 - Mapas do Índice de Vegetação Ajustado (EVI) para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.



Fonte: Os autores (2025)

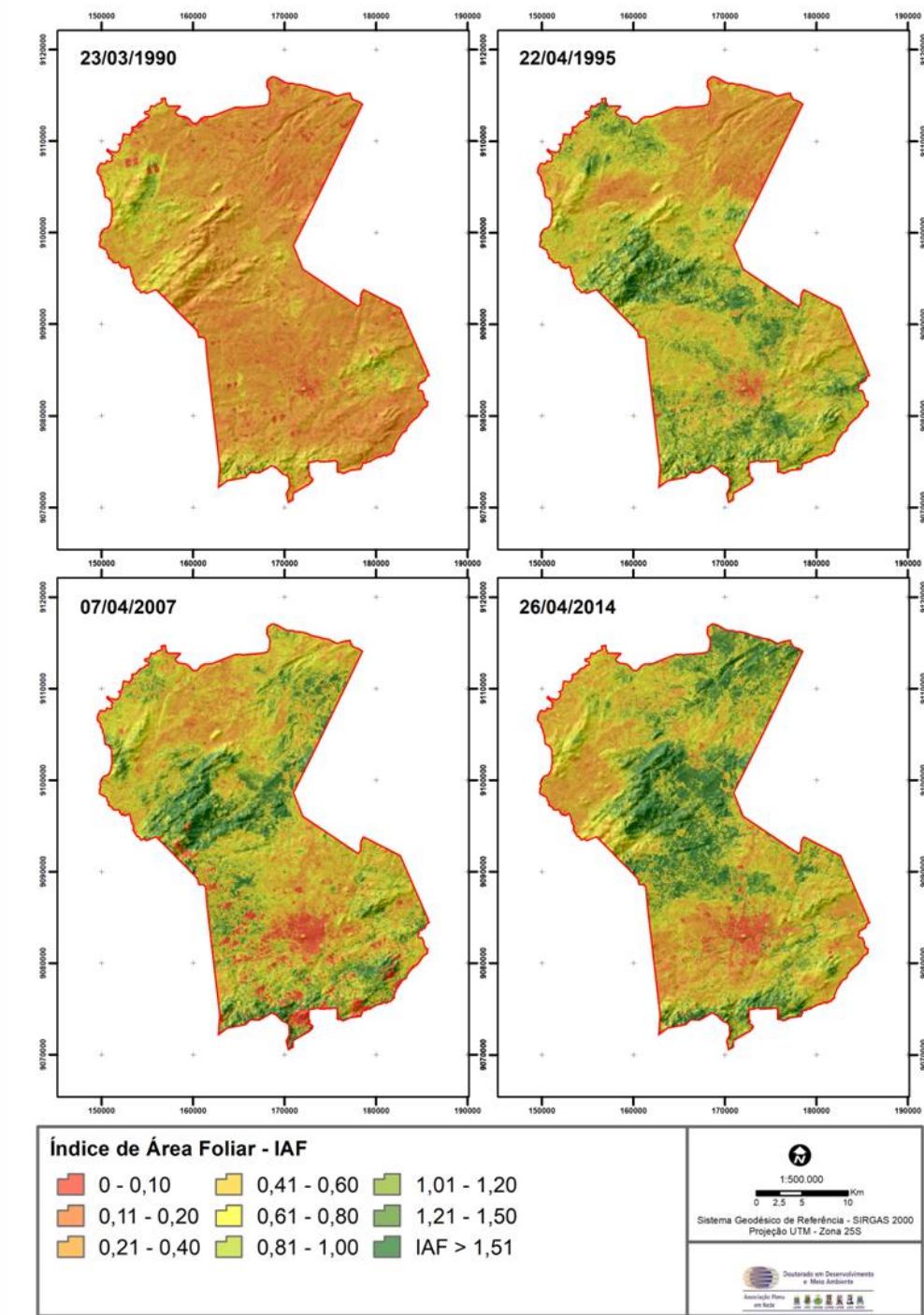
O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) apresentou maior quantidade de pixels na classe 0,31-0,40 no ano de 1990, e para os anos de 1995, 2007 e 2014 foi encontrada maior quantidade de pixels na classe entre 0,21-0,30 (Figura 4). Estas classes estão relacionadas à presença de solo exposto e vegetação seca, e à presença de vegetação esparsa e seca, respectivamente.

Figura 5 - Mapas do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.



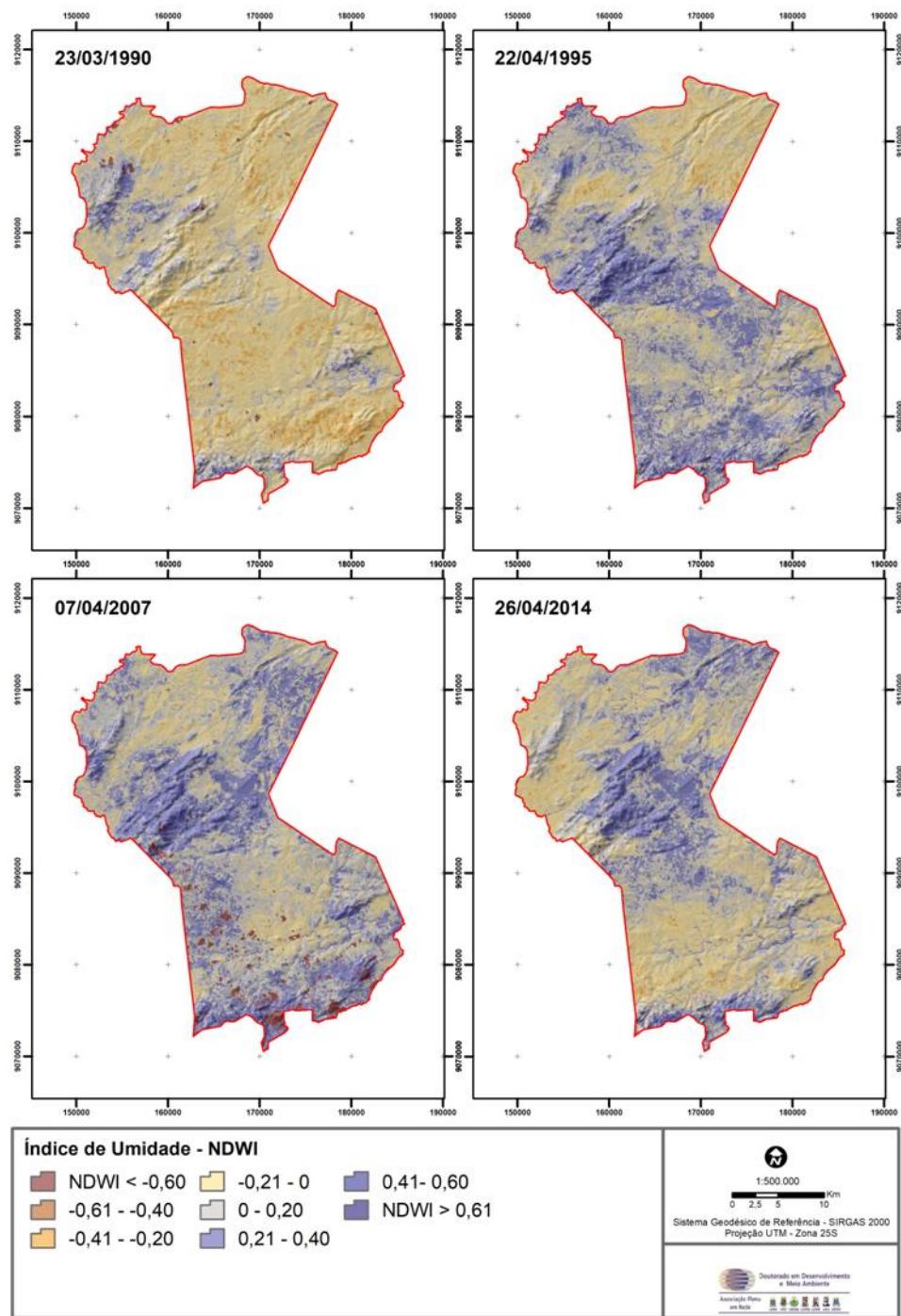
Com relação ao Índice de Área Foliar (IAF), em 1990 os valores de IAF apresentaram o maior pico dentro da classe 0,21-0,40, enquanto nas demais imagens avaliadas o maior pico está na classe 0,401-0,60 (Figura 4). Valores de IAF acima de 0,21 estão relacionados com a vegetação (Figura 7).

Figura 6 - Mapas do Índice de Área Foliar (IAF) para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.



O Índice de Umidade (NDWI) seguiu o mesmo comportamento encontrado para os demais índices (Figura 4). Na década de 1990, o maior pico pode ser visualizado na classe com valores entre -0,21 e 0 e os demais anos apresentaram maior quantidade de pixels na classe de 0 à 0,20 (Figura 4).

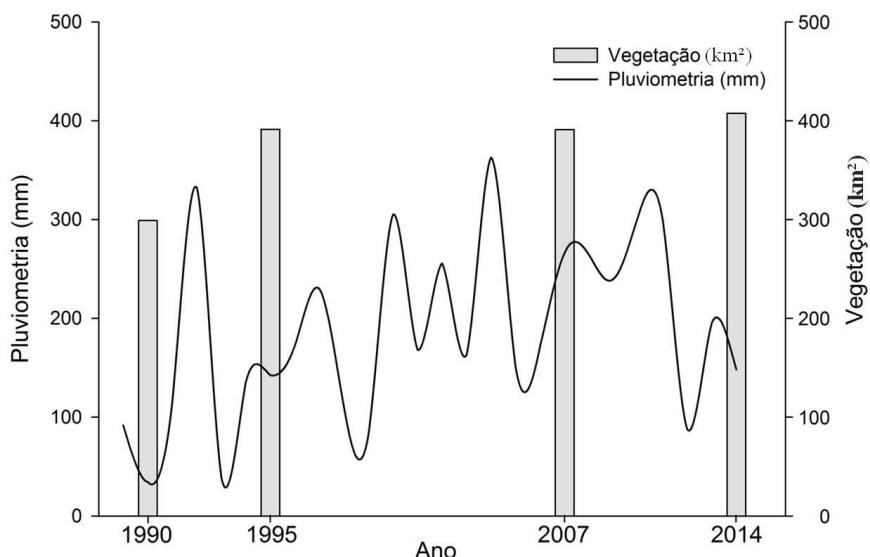
Figura 7 - Mapas do Índice de Umidade (NDWI) para a paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil, representando os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014.



Fonte: Os autores (2025)

Com relação à precipitação, foi registrada, para os três meses de chuva anteriores ao mês de obtenção das imagens, uma pluviometria de 34,3 mm, 142,4 mm, 266,3 mm e 148,3 mm para os anos de 1990, 1995, 2007 e 2014, respectivamente (Figura 3). Nestes mesmos anos a área ocupada pela vegetação na paisagem estudada foi de 374,47 km², 464,63 km², 459,88 km² e 463,08 km².

Figura 8 - Distribuição do acumulado pluviométrico (mm) dos três meses chuvosos ao longo dos anos de 1989 e 2014, e área (km²) ocupada pela vegetação nos anos de 1990, 1995, 2007 e 2014, na paisagem do município de Caruaru, Pernambuco, Nordeste do Brasil.



Fonte: Os autores (2025)

4. DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA HUMANA E CLIMÁTICA NA CONSTRUÇÃO DA PAISAGEM

A paisagem do município de Caruaru apresentou o crescimento do núcleo urbano em quase três vezes em sua extensão, sendo este crescimento acompanhado do aumento no número de habitantes e domicílios na cidade (IBGE, 2022). Dados do censo demográfico de Caruaru mostram que a população residente passou de 213.697 habitantes, em 1991, para 314.912, em 2010, e 378.048 em 2022 (IBGE, 2022). Neste mesmo intervalo de tempo inicial, a quantidade de domicílios quase dobrou, passando de 51.286 para 96.310 em 2010 (IBGE, 2022). Além disso, foi estimado um aumento de 35,2% no Produto Interno Bruto (PIB) entre os anos de 1991 e 2000 (MESQUITA e ANDRADE, 2006). Entre 2010 e 2013, os valores para o PIB per capita municipal passaram de R\$ 10.794,81 para R\$ 15.529,30,

alcançando R\$ 23.456,58 em 2022 (IBGE, 2022). Estes dados revelam a expansão do núcleo urbano da cidade de Caruaru sendo acompanhada por um crescimento demográfico e também econômico. Segundo dados do IBGE (2024), a área urbanizada de Caruaru, em 2019 chegou a 59,51 km². Essa expansão da área urbana ao longo das décadas recentes reflete um padrão de mudanças observado nas paisagens pelo mundo. Segundo Ernstson et al. (2010) o processo de urbanização contemporâneo é expresso através de mudanças na densidade populacional humana e na cobertura da terra.

As mudanças da área rural na paisagem de Caruaru, que apresentou um padrão distinto do observado na área urbana, tendo esta sido reduzida do ano de 2007 para o ano de 2014, foram acompanhadas de uma redução de 542 pessoas ocupadas no setor da agricultura em 2007 para 309 em 2013, e um aumento na quantidade de pessoas nos setores de comércio, indústria e serviços (IBGE, 2024). Este dado indica a possível migração de pessoas da área rural para ocupação de outras áreas, como a urbana. No Brasil, as redes migratórias têm se fortalecido nas cidades do interior, em virtude do aumento na quantidade de cidades e seu valor atrativo (BRAGA, 2006). Ao avaliar o processo de urbanização na China, Zhang e Song (2003) identificaram que a migração das pessoas da área rural para a área urbana resultou no aumento da população urbana, seguido pelo crescimento econômico do País. O mesmo parece estar ocorrendo no município de Caruaru que, de acordo com dados do IBGE (2024), vem apresentando crescimento demográfico e econômico constante.

A migração de pessoas da área rural para outros locais pode estar relacionada às condições climáticas da região. A paisagem estudada encontra-se em região de clima semiárido, onde há elevada incidência luminosa e temperatura, além de chuvas inconstantes, geralmente concentradas de fevereiro a abril (BARBOSA et al., 1989). Tais condições promovem eventos de seca que podem estimular a migração de pessoas em busca de novos locais para se assentarem. Essa migração de grupos humanos em virtude da recorrência de eventos de seca vem sendo documentada no semiárido brasileiro (ALMEIDA et al., 2016). Ao realizar uma análise histórica de uma paisagem na região do Araripe, no semiárido brasileiro, Almeida et al. (2016) observaram que a migração, o desmatamento, e o abandono de terras foram considerados os principais dirigentes de modificações na paisagem local. A migração de grupos humanos, com consequente desmatamento de novos locais para assentamento e abandono das terras previamente ocupadas pode ser um dos principais fatores responsáveis pelas mudanças na configuração das áreas de solo exposto e vegetação observada ao longo dos anos na paisagem em estudo.

Considerando que as áreas de vegetação da paisagem avaliada consistem predominantemente de vegetação de Caatinga, existem algumas características típicas para este bioma que não podem ser

negligenciadas. Este tipo vegetacional é caracterizado como um mosaico de florestas que respondem ao regime sazonal de chuvas que ocorrem em cada região (LEAL et al., 2005). As espécies vegetais que a compõe geralmente perdem suas folhas durante a estação seca, voltando a desenvolvê-las quando se iniciam as chuvas (BARBOSA et al., 1989; PRADO, 2003; LEAL et al., 2005). Apesar de todas as imagens analisadas neste estudo serem obtidas durante o período chuvoso, o ano de 1990 foi marcado pelo início do fenômeno de “El nino” (TRENBERTH, 1997). Este fenômeno promove fortes alterações climáticas, modificando o regime de chuvas (TRENBERTH, 1997). Dados de relatórios Climanálise do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2017) mostram que houve um extenso período de seca no nordeste brasileiro de 1990 a 1993, com precipitações 28% abaixo da média em 1990. Considerando a sensibilidade da vegetação de Caatinga às chuvas, provavelmente o menor percentual de área vegetada encontrado para o ano de 1990 ocorreu em função da menor disponibilidade hídrica observada, provavelmente decorrente do início do *El nino*.

Os menores valores de EVI, SAVI, IAF e NDWI encontrados em 1990, quando comparados com as outras décadas, provavelmente estão associados à baixa pluviometria decorrente do início do El nino neste ano. A pluviometria registrada neste ano foi bem inferior à registrada em 1995, 2007 e 2014. De acordo com Formigoni et al. (2011), os valores de EVI são influenciados pelo regime pluviométrico, sendo seus maiores valores encontrados apenas nos meses de maior precipitação. Segundo esses autores, entre os biomas brasileiros, a Caatinga é o que apresenta os menores valores de EVI, corroborando com os resultados encontrados nesta pesquisa.

Com relação ao SAVI, este índice inclui um fator de correção para minimizar os efeitos do brilho refletido pelo solo, e vem sendo utilizado especialmente em locais onde a vegetação é esparsa, como ocorre em regiões semiáridas (HABOUDANE et al., 2004), como a Caatinga. Os menores valores de SAVI indicam a presença de vegetação mais esparsa ou solo exposto (OLIVEIRA et al., 2015), conforme encontrado neste estudo. No semiárido brasileiro, Vigano et al. (2011) indicaram valores de SAVI entre 0,21 e 0,32 associado às áreas de solo exposto. Sendo assim, os valores mais baixos desse índice para a década de 1990 provavelmente estão associados à baixa pluviometria decorrente do El nino, que culminou na menor densidade de vegetação e, portanto, na maior quantidade de área de solo exposto.

O IAF é amplamente utilizado para análises da vegetação, permitindo a análise de parâmetros estruturais na cobertura vegetal de uma dada área (DIJK e BRUIJNZEEL, 2001), admitindo inferências com relação às respostas da vegetação às condições climáticas. Kalacska et al. (2005) observaram em sua pesquisa a influência do clima e dos diferentes tipos de uso da terra no IAF, o que também pode

ser inferido no presente estudo, uma vez que este índice mostrou menores valores provavelmente em função da menor precipitação na década de 1990. O NDWI, com valores negativos para 1990, indica a presença de vegetação seca, já os valores positivos representam a vegetação verde, mais densa (CARDOZO et al., 2009). Seguindo essa interpretação, a década de 1990 apresentou maior extensão de área ocupada por vegetação seca, enquanto as demais décadas tiveram maior extensão de vegetação verde. O NDWI permite a estimativa do conteúdo de água das plantas, fornecendo relevantes informações para ambientes onde este recurso é escasso, como as regiões semiáridas (OLIVEIRA et al., 2010; FRANÇA et al., 2013). Este índice apresenta valores negativos em áreas onde a vegetação encontra-se seca, com menor precipitação (BRITO et al., 2017). Brito et al. (2017), avaliando NDWI no semiárido brasileiro, observaram que seus valores variaram de acordo com a precipitação, sendo encontrados valores negativos nos meses de menor precipitação, e valores mais elevados no período chuvoso.

Nos anos de 1995 a 2014 podem ser visualizadas mudanças na configuração das áreas de vegetação na paisagem, o que indica a possibilidade da ocorrência de um processo de fragmentação da paisagem no município de Caruaru decorrente do desenvolvimento de atividades humanas, como a migração de grupos humanos e expansão da área urbana. Tais atividades humanas podem tornar locais previamente desmatados ou utilizados para atividades agropecuárias que foram abandonados sujeitos ao processo de regeneração. Através de diversas formas de uso da terra, as pessoas promovem a formação de fragmentos descontínuos em áreas onde antes havia a formação de florestas contínuas (VALENTE e VETTORAZZI, 2002).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa evidencia o papel das pessoas e do clima como dirigentes de modificações nas paisagens. Tanto as atividades humanas ligadas à urbanização e à migração de grupos humanos, como as condições climáticas, mostram-se como fatores imprescindíveis para a compreensão da dinâmica de construção das paisagens. As mudanças provocadas pelas atividades humanas na paisagem ocorreram tanto nas proximidades de áreas urbanas, como nas áreas rurais, mais próximas à vegetação. As mudanças espaciais e temporais mais evidentes ocorreram com o crescimento da área urbana, que acompanhou o crescimento demográfico e econômico do município estudado. Com relação às áreas florestadas, por se tratar de uma área de vegetação de Caatinga, as mudanças espaciais e temporais em grande escala mostraram ser influenciadas principalmente pelas variáveis climáticas. O fenômeno de El

nino, iniciado na década de 1990, parece ter modificado a pluviometria da região, o que influenciou os resultados encontrados para a extensão da área de vegetação e para os índices de vegetação avaliados. Os índices de vegetação avaliados, EVI, SAVI, IAF e NDWI mostraram-se como ferramentas úteis para a avaliação da dinâmica espaço-temporal de paisagens, uma vez que refletem características climáticas. Tais índices podem ser aplicados com eficiência em ambientes semiáridos como a Caatinga, trazendo resultados relevantes para o monitoramento deste bioma.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos às instituições e agências de fomento apoiadoras desta pesquisa, que incluem a Coordenação de Aperfeiçoamento de (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSERTÃO-PE), Programa de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Programa de Pós-graduação em Ecologia Humana e Gestão Socioambiental (PPGECOH).

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.M.A.; RAMOS, M.A.; ARAÚJO, E.L.; BALDAUF, C.; ALBUQUERQUE, U.P. Human perceptions of landscape change: The case of a monodominant forest of *Attalea speciosa* Mart ex. Spreng (Northeast Brazil). **AMBIO**, v. 45, n. 4, p. 458-67, 2016.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)**. Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0. 2002. 97p.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22, 711–728. 2014.

APAC. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**, 2016. Disponível:
<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso: 10 out. 2016.

BARBOSA, D.C.A.; ALVES, J.L.H.; PRAZERES, S.M.; PAIVA, A.M.A. Dados fenológicos de 10 espécies arbóreas de uma área de Caatinga (Alagoinha-PE). **Acta Botanica Brasilica**, v. 3, n. 2, p. 109-117, 1989.

BRAGA, F.G. Migração Interna e Urbanização no Brasil Contemporâneo: Um estudo da Rede de Localidades Centrais do Brasil (1980/2000). **XV Encontro Nacional de Estudos Popacionais**, ABEP, Caxambú- MG, Brasil, 2006.

BRITO, P.V.S.; MORAIS, Y.C.B.; FERREIRA, H.S.; SILVA, J.F.; GALVÍNCIO, J.D. Comparative analysis of moisture of vegetation of preserved caatinga areas, irrigated agriculture, and drought. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 493-498, 2017.

CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SILVA, G. B. S. S.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sul matogrossense a partir de imagens orbitais. In: **2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Corumbá, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 99-106, 2009.

CASAS, A.; PICKERSGILL, B.; CABALLERO, J.; VALIENTE-BANUET. Ethnobotany and domestication in Xoconochtli, Stenocereus stellatus (Cactaceae), in the Tehuacán Valley and La Mixteca Baja, México. **Economic Botany**, v. 51, n.3, p. 279-292, 1997.

CLEMENT, R. C. Melhoramento de espécies nativa. In: **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**, NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I.S.; VALADARES-INGLIS, M.C. Brasilia. Embrapa, p. 423-441, 2001.

CLIMANÁLISE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2017. Episódios El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. **Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos** (CPTEC/INPE). Disponível:
<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/nino.html>. Acesso: 17 mar. 2017.

ERNSTSON, H.; VAN DER LEE, W.S.E.; REDMAN, C.L.; MEFFERT, D.J.; DAVIS, G.; ALFSEN, C.; ELMQVIST, T. Urban Transitions: On Urban Resilience and Human-Dominated Ecosystems. **AMBIO**, v. 39, p. 531–545, 2010.

FARIAS, S.G.; PEREIRA, C.B. Análise espaço-temporal da mudança de uso e ocupação da terra no município de cametá, pará - 1985 A 2020. **Revista Verde Grande: Geografia e interdisciplinaridade**, v. 6, n. 1, p. 286-305, 2024.

FORMIGONI, M.H.; Xavier, A.C.; Lima, J.S.S. Análise temporal da vegetação na região do nordeste através de dados EVI do MODIS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 1-8, 2011.

FRANÇA, L.M.A.;OLIVEIRA, T.H.;PEREIRA, J.A.S.;LINS, T.M.P.;GALVÍNCIO, J.D. Spatial Analysis of Caatinga Vegetation in the Municipality of Ibimirim-PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 3, n. 3, p. 59-70, 2013.

GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.

HABOUDANE, D.;MILLER, J.R.;PATTEY, E.;ZARCO-TEJADA, P.J.;STRACHAN, I.B. Hyperspectral vegetation índices and novel algorithms for predictig green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, n. 90, p. 337-352, 2004.

Hooke, R.L.; Duque, M.; Pedraza Gilsanz, J. Land transformation by humans: a review. **GSA Today**, v. 22, n. 12, p. 4–10, 2012.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v.4, n.4, p.367-376, 1988.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**,v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/caruaru.html>. Acesso: 10 outubro 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru>. Acesso: 10 outubro 2024.

JENSEN, J. R. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. 4 ed., Prentice Hall. 1996. 316p.

KALACSKA, M.E.R.; SÁNCHEZ-AZOFÉIFA, G.A.; CALVO-ALVARADO, J.C.; RIVARD, B.; QUESADA, M. Effects of Season and Successional Stage on Leaf Area Index and Spectral Vegetation Indices in Three Mesoamerican Tropical Dry Forests. *Biotropica*, v. 37, n. 4, p. 486-496, 2005.

LEAL, I.R.;SILVA, J.M.C.;TABARELLI, M.;LACHER, J.R.T.E. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. *Megadiversidade*, v. 1, n. 1, p. 139-146, 2005.

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MEDEIROS, R. M.; DE HOLANDA, R.M.; DE FRANÇA, M.V. Caruaru – PE, seu conforto ou desconforto térmico em anos de el niño, la niña. *Revista Mirante*, v. 14, n. 1, p. 103-117, 2021.

MESQUITA, G.B.; ANDRADE, A.M. O desenvolvimento local de caruaru via indústria de confecção: uma alternativa possível? *Interfaces*, v. 6, n. 2, p. 1-14, 2006.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. 2024. *Caatinga*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/caatinga>> Acesso em 10 de outubro de 2024.

OLIVEIRA, T.H.;MACHADO, C. C. C.;SILVA, J. S.;GALVÍNCIO, J.D.; PIMENTEL, R. M. M.;SILVA, B. B. Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaco-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, n. 3, p. 55-69, 2010.CONFERIR ANO

OLIVEIRA, T.H.; GALVÍNCIO, J.D. Use and Land Cover in Areas of Northeast Brazil Semiarid. *Revista de Geografia*, v. 28, n. 1, p. 120-133, 2011. CONFERIR ANO

PRADO, D. As caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.;SILVA, J.M.C. (Eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. pp. 3-73. 2003.

SARA. *Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária*, Governo do Estado de Pernambuco, 2015. Disponível: http://www.agricultura.pe.gov.br/interna.php?p=dadospluviometricos&s=RD8_Q_caruaru. Acesso: 03 out. 2015.

SANTANA, M.F.;DELGADO, R.C.;OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.;GOIS, G.;TEODORO, P.E. Variability of the Atlantic Forest based on the EVI index and climate variables in Cunha-SP, Brazil. *Revista de Ciências Agroambientais*, v. 14, n. 1, p. 37-44, 2016.

SHAMS, J.C.A.; GIACOMELI, D.C.; SUCOMINE, N.M. Emprego da arborização na melhoria do conforto térmico nos espaços livres públicos. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 4, n. 4, p. 1-16, 2009.

SILVA, T.S. Desmatamento na américa do sul: uma análise econômica da relação entre produção de alimentos, urbanização e desenvolvimento humano. **Revista Catarinense de Economia**, v.7, n.1, p. 16-27, 2023.

SILVA, B.F.; FRANÇA, L. M. A.; SILVA, J. B. S.; SILVA, A. K. O. Análise espaço-temporal do índice de vegetação ajustado ao solo para a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu (Rio Grande do Norte/Paraíba). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, p. 02-10, 2020.

TRENBERTH, K.E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 2771:2777, 1997.

UNESCO. **Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura**. 2014. Convention for the safeguarding of the intangible cultural heritage. Report on the implementation of the Convention and on the status of elements inscribed on the Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity, Brazil.

USGS. **United States Geological Survey**. Disponível: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product> Acesso: 01 jan. 2017.

VALENTE, R.O.A.; VETTORAZZI, C. A. Análise da estrutura da paisagem na Bacia do Rio Corumbataí, SP. **Scientia Forestalis**, n. 62, p. 114-129, 2002.

WILLKOMM, M.; VIERNEISEL, B.; DANNENBERG, P. Land use change dynamics in the Mt. Kenya region-a remotely sensed analysis using RapidEye satellite images. **Zentralblatt für Geologie und Paläontologie**, v. 1, p. 23-40. 2016.

ZHANG, K.H. & SONG, S. Rural–urban migration and urbanization in China: Evidence from time-series and cross-section analyses. **China Economic Review**, v. 14, n.4, p. 386-400, 2003.

ZIPPERER, W.C.; FORESMAN, T.W.; WALKER, S.P.; DANIEL, C.T. Ecological consequences of fragmentation and deforestation in an urban landscape: a case study. **Urban Ecosystems**, v. 15, n. 3, p. 533-544, 2012.