

## Relationship between the variability of urban expansion, air temperature, and surface area of water bodies in the city of Salgueiro, Pernambuco

Rebecca Borja Gonçalves Gomes de Menezes<sup>\*</sup>, Camila Oliveira de Britto Salgueiro<sup>\*\*</sup>, Sylvana Melo dos Santos<sup>\*\*\*</sup>, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva<sup>\*\*\*\*</sup>, Leidjane Maria Maciel de Oliveira<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil, rebecca.borja@ufpe.br;

<sup>\*\*</sup> Mestranda do PPGEC / UFPE, Recife-PE, Brasil, camila.salgueiro@ufpe.br;

<sup>\*\*\*</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV), Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, sylvana.santos@ufpe.br;

<sup>\*\*\*\*</sup> DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, anderson.paiva@ufpe.br;

<sup>\*\*\*\*\*</sup> DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, leijdane.oliveira@ufpe.br.

Received 10 November; accepted 05 December

### Abstract

The significant increase in urban expansion in recent years is attributed to substantial demographic growth, accelerated industrialization, economic progress and the migration of people from rural areas to urban centers. Climate change has the potential to worsen urban heat islands, resulting in higher urban temperatures, which in turn have significant implications for public health. In this sense, the objective of this work is to understand the transformations on the surface and their impact on the climate of the municipality of Salgueiro-PE, analyzing changes in land use and occupation, as well as changes in areas with vegetation and in the surface areas of the main bodies urban water supply, through the application of remote sensing techniques. Images from the Landsat 8 satellite system and MapBiomias were analyzed in 2013 and 2021, along with rainfall and air temperature data. When comparing the years, it was noted that there was a 42% increase in the urbanized area, while average air temperatures have also increased in recent years. The MNDWI spectral index was used to calculate the surface area, which found that there was an increase in the water mirrors of the water bodies analyzed. Thus, it was observed that the increase in impervious areas caused by urbanization probably generates greater surface runoff in the basins contributing to these water bodies, as well as the influence of the rainfall regime in the year of study.

Keywords: Remote sensing, Landsat 8, MapBiomias, urbanization, air temperature.

## Relação entre a variabilidade da expansão urbana, temperatura do ar e área superficial de corpos hídricos na cidade de Salgueiro - PE

### Resumo

O significativo aumento da expansão urbana nos últimos anos é atribuído ao substancial crescimento demográfico, à acelerada industrialização, ao progresso econômico e à migração de pessoas das áreas rurais para os centros urbanos. As mudanças climáticas têm o potencial de agravar as ilhas de calor urbanas, resultando em temperaturas urbanas mais altas, o que por sua vez acarreta implicações significativas para a saúde pública. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é compreender as transformações na superfície e seu impacto no clima do município de Salgueiro-PE, analisando as mudanças no uso e ocupação do solo, bem como as alterações em áreas com vegetação e nas áreas superficiais dos principais corpos d'água urbanos, por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Foram analisadas imagens do sistema satélite Landsat 8 e do *MapBiomias* nos anos de 2013 e 2021, juntamente com dados pluviométricos e de temperatura do ar. Quando comparados os anos, notou-se que houve um aumento de 42% na área urbanizada, ao passo que as temperaturas médias do ar também aumentaram nos últimos anos. O índice espectral MNDWI foi utilizado para o cálculo da área superficial, onde constatou que houve aumento nos espelhos d'água dos corpos hídricos analisados. Dessa forma, observou-se que o aumento de áreas impermeáveis acarretadas pela urbanização, provavelmente gera maior escoamento superficial nas bacias de contribuição desses corpos hídricos, como também a influência do regime pluviométrico no ano de estudo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Landsat 8, MapBiomias, urbanização, temperatura do ar.

### 1. Introdução

A aceleração no processo de urbanização sem planejamento vem intensificando a ocorrência de problemas ambientais, tornando uma realidade no cenário mundial fenômenos vinculados ao aumento do escoamento superficial, formação de ilhas de calor e

desmatamento das vegetações, trazendo consequências tanto a curto como a longo prazo na vida da sociedade como um todo. Adicionalmente, segundo Meireles (2023), são gerados uma série de problemas, não só ambientais, como também sociais e econômicos, sendo assim necessário um maior

planejamento urbano para o crescimento responsável e sustentável, beneficiando assim tanto a população como o meio ambiente para enfrentar as mudanças climáticas.

Áreas com configurações iniciais predominantemente rurais passam a apresentar focos de urbanização, substituindo superfícies antes vegetadas para urbanizadas. De acordo com Song et al. (2018), tais mudanças no uso e cobertura do solo alteram consideravelmente a dinâmica de funcionamento da Terra e seus ciclos bioquímicos, contribuindo para as mudanças climáticas e afetando as propriedades e características da superfície terrestre.

Vale citar, adicionalmente, que a retirada da vegetação original tem grandes consequências para o grau de infiltração da água precipitada, uma vez que em condições sem modificação, ao atingir o solo, parte dessa água infiltra e outra é absorvida pela vegetação, enquanto que em um cenário com modificações, observa-se uma diminuição do volume de água que infiltra, passando a contribuir para o escoamento superficial e consequentes erosões e danos à qualidade da água dos mananciais hídricos superficiais, de acordo com Costa et al. (2016). Dessa forma, o incremento da urbanização gera, consequentemente, o aumento nas superfícies impermeáveis como, por exemplo, a pavimentação de ruas, a construção de áreas de estacionamento, de calçadas e de residências, entre outros, e portanto, passa a gerar um acréscimo no escoamento superficial.

Segundo Bezerra (2009), têm-se também como uma das principais consequências, modificações ligadas as condições climáticas, visto que a alta absorção de carga térmica pela superfície gera o aumento nas temperaturas das áreas urbanizadas, quando comparada com as das áreas rurais adjacentes. Tal fenômeno, conhecido como “ilha de calor”, está vinculado aos desconfortos térmicos vivenciados em zonas urbanizadas.

Nesse cenário, o uso de sensoriamento remoto e de geoprocessamento emerge como ferramentas de grande relevância, oferecendo um potencial significativo para a análise de questões ambientais, como os padrões de ilhas de calor urbanas e o uso do solo (Filgueiras et al., 2016). O sensoriamento remoto viabiliza o monitoramento da biodiversidade ao combinar múltiplas fontes de informações e à exploração sistemática de todas as unidades territoriais. Isso resulta em benefícios ao obter informações com ampla cobertura espacial abrangente da área em estudo (Coelho, 2016). Essa ferramenta possibilita a obtenção de dados da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os objetos e materiais que constituem a paisagem. Isso abre caminho para a supervisão, medição e análise de

características biofísicas e atividades humanas relevantes, conforme Galdino e Ferreira (2023).

Deve-se assinalar que, a observação das mudanças no comportamento hídrico em relação à variação da cobertura vegetal por meio de técnicas de sensoriamento remoto está se tornando cada vez mais frequente em âmbito global (Farias et al., 2017). Nesse foco, Gordon et al. (2005), comentaram que diversas aplicações têm sido feitas no Sertão nordestino, uma região marcada por extensos períodos de seca que resultam em um cenário de intensa escassez de água e, por consequência, de recursos vegetais e hídricos na área.

Almeida et al. (2023) delimitaram e quantificaram a área hídrica do reservatório Poço da Cruz localizado em Ibimirim – Pernambuco, Semiárido do Brasil, com modelagem baseada em imagens multiespectrais do satélite Landsat 8/OLI datadas de 2015 a 2020, utilizando a modelagem do Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI), onde geraram-se os mapas temáticos georreferenciados e extraídos apenas os pixels representados por valores espectrais positivos, que representam alvos hídricos. Nos resultados obtidos ficou evidenciada a variação da área hídrica do reservatório em relação à ocorrência de eventos chuvosos, especialmente, em outubro/2017 (mínimos valores) e outubro/2020 (máximos valores).

Silva Junior et al. (2021) identificaram as alterações nas áreas de mata ciliar da Caatinga, a partir da sensibilidade espectral de alguns índices de vegetação (IVs), em especial o NDVI considerando uma análise espaço temporal (1985 a 2019) no entorno do Reservatório de Serrinha II – PE - Brasil. Para isso, foram utilizadas imagens dos satélites TM - Landsat 5, OLI - Landsat 8 e MSI - Sentinel 2. Os IVs foram validados comparando perfis espectrais e correlação dos produtos gerados pelo Landsat 8 e Sentinel 2. Nos resultados obtidos constatou-se que o NDVI apresentou maior sensibilidade para identificar a mata ciliar com coeficiente de Pearson igual a 0,93 para o Landsat 8; 0,94 para o Sentinel 2 e acurácia global superior a 95%.

Nesse contexto, o trabalho em questão busca entender a relação entre a variabilidade da expansão urbana, a temperatura média do ar e a área superficial de corpos hídricos referentes ao município de Salgueiro - PE, principalmente no que diz respeito a variação do uso e ocupação do solo entre os anos de 2013 e 2021, a partir da avaliação de imagens provenientes da Coleção 7 do *MapBiomass* e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), assim como a modificação da área vegetada e da área dos principais espelhos d'água urbanos, a partir da aplicação do Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI), correlacionando

também com as temperaturas médias do ar monitoradas do município nos anos de 2012 e 2021.

## 2. Material e métodos

### Área de estudo

Localizado na mesorregião do Sertão Pernambucano, o município de Salgueiro – PE conforme a Figura 1, conta com uma superfície territorial de 1.678,564 km<sup>2</sup>, abrigoando cerca de

62.372 habitantes, conforme IBGE (2023). O município é caracterizado por apresentar uma temperatura do ar média diária acima de 36°C no período quente (verão), podendo alcançar 37°C em seu dia mais quente; e, no período frio (inverno) a temperatura do ar média diária é abaixo de 33°C, podendo chegar a 18°C em seu dia mais frio. O clima na região é o tropical chuvoso e a vegetação predominante é a de Caatinga xeromórfica (Andrade et al., 2021; De Paulo e Quirino, 2014).

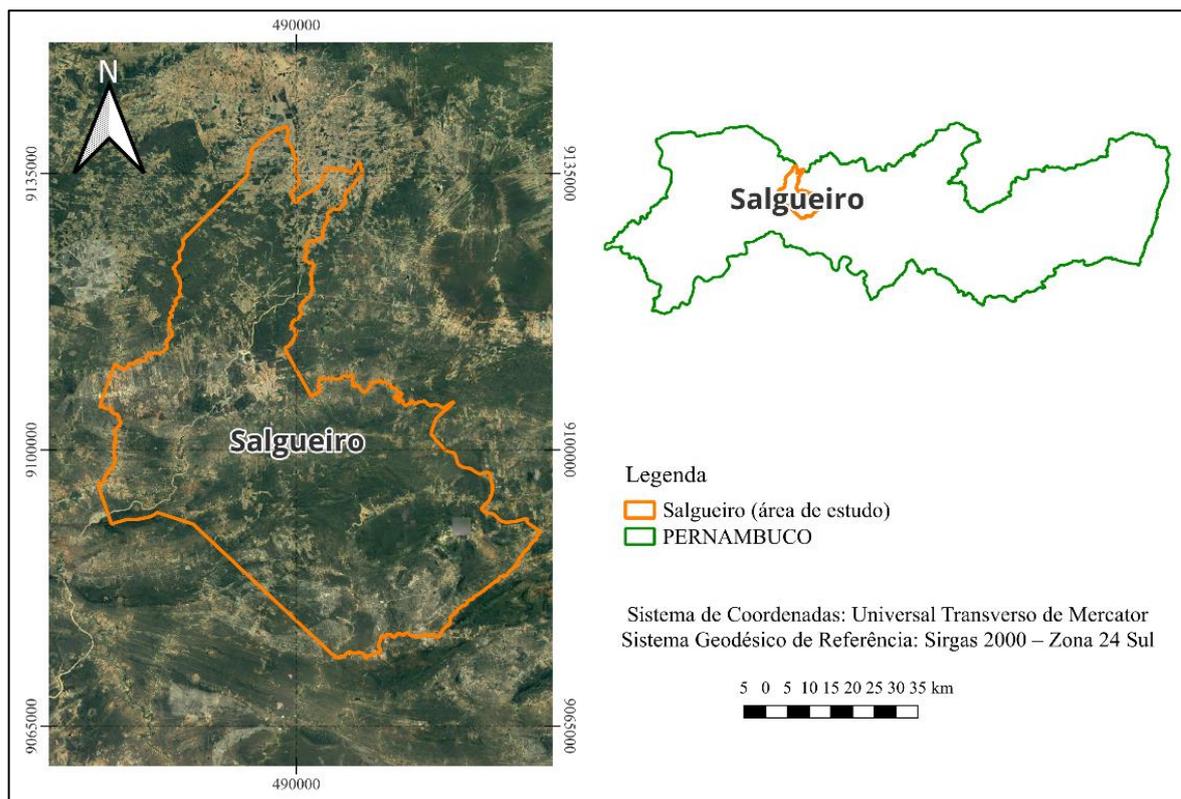


Figura 1 - Localização da área de estudo (Salgueiro-PE).

Salgueiro faz parte da Unidade de Planejamento 12 do Rio Terra Nova do no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH/PE. Com localização estratégica, apresenta-se como centro logístico e dessa forma é conhecida como a “Encruzilhada do Nordeste” por estar equidistante das principais capitais regionais e ser ponto de cruzamento de diferentes rodovias existentes (BR-116 e BR-232), passagem da ferrovia Transnordestina e do eixo norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. Por esses fatores, o setor de Serviços é o mais expressivo em relação a formação do Produto Interno Bruto (PIB) da UP 12 Terra Nova (Pernambuco, 2022).

É importante ressaltar que a população de Salgueiro-PE chegou a 62.372 habitantes no Censo de 2022, o que representa um aumento de 10,14% em comparação com o Censo de 2010 (IBGE, 2023). Nota-se que a porção urbanizada é concentrada nas coordenadas 486070.45 m E e 9107868.76 m S (*Datum*: Sirgas 2000), sofrendo com os processos de crescimento da urbanização ao longo dos anos. A Figura 2 apresenta o detalhamento das modificações ao longo dos anos de 2012 e 2022, sendo possível perceber uma intensa modificação em relação as características da superfície, com expansão das áreas urbanas. De maneira mais específica, é notório a presença de corpos hídricos ao longo do espaço urbanizado, também sofrendo modificações ao longo do período.



a) 2013.



b) 2021.

Figura 2 - Porção urbanizada de Salgueiro-PE. Fonte: Google Earth (2023).

Em relação ao contexto urbano encontrado na extensão do município, a Figura 3 apresenta os

principais corpos hídricos encontrados na área urbanizada para Salgueiro - PE.

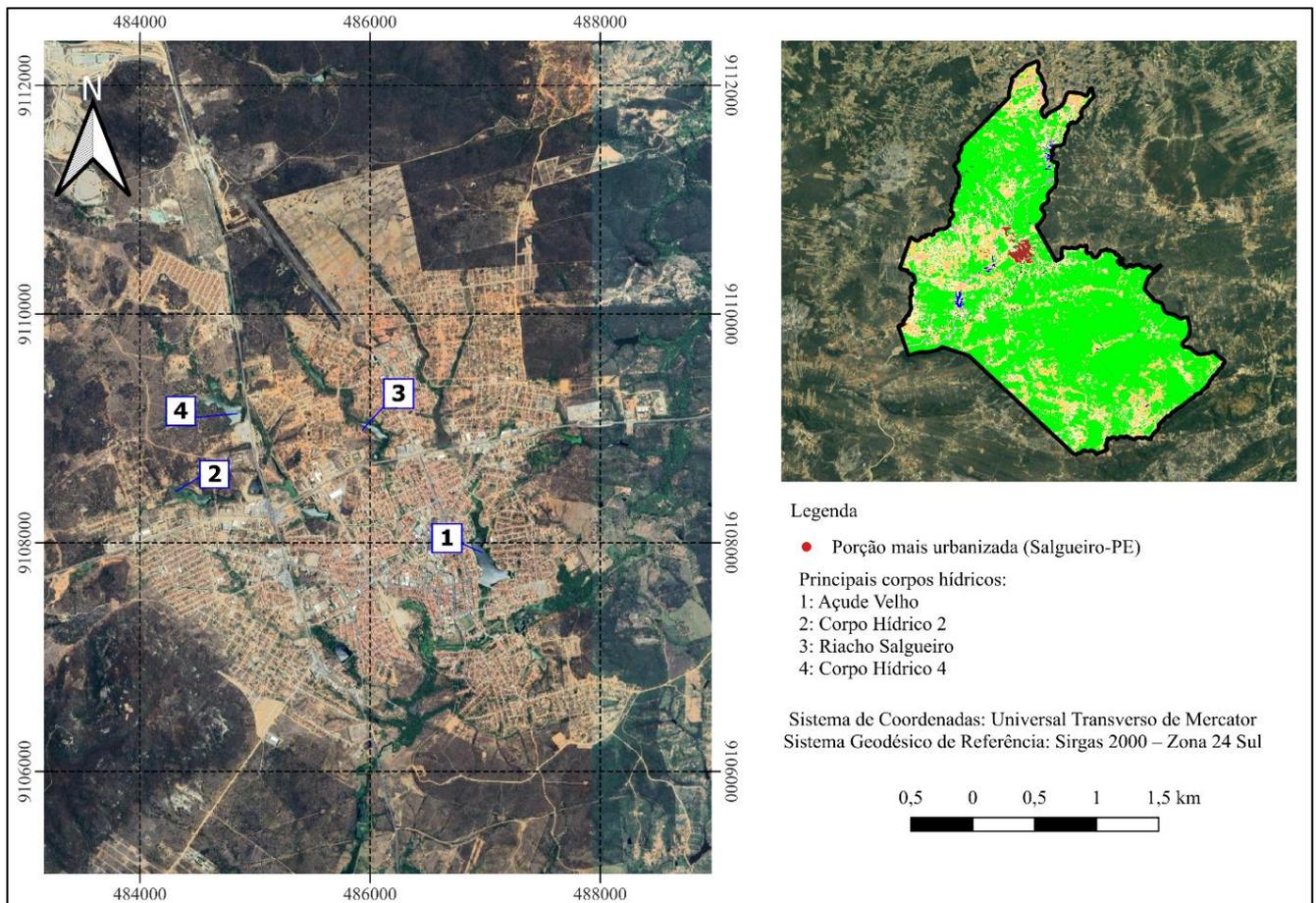


Figura 3 - Principais corpos hídricos encontrados na área urbanizada para Salgueiro - PE.

### MapBiomass

O Sensoriamento Remoto (SR) funciona como ferramenta para a avaliação do uso e ocupação

do solo, visando o correto entendimento das particularidades de cada área e funcionando como base para delimitação de cada tipologia do solo. Dessa forma, é possível avaliar o aumento ou diminuição de

determinado tipo de ocupação no decorrer de um determinado período. De acordo com Freitas et al. (2023), têm-se cada vez mais a utilização do mapeamento da dinâmica do uso e cobertura da Terra a partir da aplicação do SR, com objetivo de ordenar as regiões do ponto de vista ambiental e territorial.

Para aplicação da metodologia, conceitua-se como elemento unitário os chamados *pixels*, caracterizados pela resolução espectral (bandas), resolução espacial (escala da imagem) e resolução temporal (variabilidade temporal entre as passagens do sensor sobre uma mesma área), de acordo com Becker (2016). Dessa forma, têm-se a iniciativa do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (*MapBiomias*), com início em 2015, que tem como objetivo o mapeamento do uso e cobertura da terra em escala nacional e disponibiliza anualmente dados de uso e cobertura no Brasil, em formato raster, mapas e gráficos (MapBiomias, 2022).

Utilizaram-se imagens provenientes da Coleção 7 do *MapBiomias*, a partir da classificação pixel a pixel de imagens do satélite Landsat com resolução espacial de 30 m, em formato GeoTiff e advindas da plataforma GEE (*Google Earth Engine*). Foi possível, então, com auxílio do software de livre acesso QGIS, a classificação do uso e cobertura do solo para os dois anos de estudo, com foco na análise comparativa da área urbanizada e corpos hídricos, a partir da aplicação do *r.report*, complemento que permite gerar um relatório que detalha os principais tipos de áreas definidas.

#### *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

O Índice de Vegetação Por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*), tem a capacidade de detectar modificações na área de vegetação de determinada superfície. De acordo Cohen et al. (2003), este índice é o mais difundido, podendo ser analisado por meio da interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, por valores obtidos em diferentes datas, que permitem avaliar a variação do vigor vegetativo em determinado período, como foi pesquisado neste artigo. Adicionalmente, Holanda e Guerra (2010) citaram que para o NDVI, a distinção de elementos como nuvens é dificultada, graças a sua proximidade com a resposta espectral de outras feições na imagem, como, por exemplo, solo ou baixa cobertura vegetal, podendo interferir na interpretação do mesmo.

Os valores de NDVI variam de -1 a 1, em que os valores próximos a 1 indicam regiões com maior densidade de vegetação ativa, ao passo que os valores mais próximos de -1 indicam áreas com menor presença de vegetação, como corpos d'água e neve (Braz et al., 2018).

As imagens utilizadas referem-se às datas 24/06/2013 e 02/09/2021 e são provenientes do sistema satélite OLI Landsat 8, Coleção 2, Nível 2. Foram obtidas a partir do catálogo de imagens do *United States Geological Survey (USGS)* e o critério utilizado para escolha das imagens foi a menor presença de nuvens. Para a confecção dos mapas de NDVI, foram utilizadas as bandas espectrais B5 - Infravermelho próximo (comprimento de onda: 0,85 – 0,88  $\mu\text{m}$ ) e B4 - Visível vermelho (comprimento de onda: 0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ), ambas com resolução espacial de 30 m. A modelagem georreferenciada corresponde a Equação 1, utilizando a ferramenta “calculadora raster” do software de livre acesso QGIS versão 2.18.22.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (1)$$

em que:

NDVI é o índice de vegetação;

NIR é a reflectância para banda do infravermelho próximo;

Red é a reflectância para a banda do visível vermelho.

Para o cálculo da reflectância de cada banda utilizada, aplicou-se a Equação 2, de acordo com a USGS (2023A).

$$\rho_{\lambda_i} = A_{\rho_i} + M_{\rho_i} * \text{NDI} \quad (2)$$

em que:

$\rho_{\lambda_i}$  (adimensional) é a reflectância planetária na superfície terrestre de cada banda  $i$ ;

$M_{\rho_i}$  é o fator multiplicativo de redimensionamento da banda = 0,0000275;

$A_{\rho_i}$  é o fator de redimensionamento aditivo da banda = -0,2;

NDI é número digital correspondente a intensidade do pixel de cada banda.

#### *Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI)*

O Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) foi proposto por Xu (2006), a fim de obter resultados mais efetivos na delimitação de corpos hídricos em regiões que possuem áreas construídas. Xu (2006) utilizou como base a modelagem do cálculo do Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), onde em alguns detalhamentos as construções muitas vezes se misturam com os corpos d'água. A modificação consiste na substituição da banda do infravermelho próximo para o infravermelho médio.

Segundo Xu (2006), o MNDWI é capaz de conferir valores ainda mais positivos às áreas de água, uma vez que a banda do infravermelho médio demonstra maior absorção de energia em corpos d'água do que a banda do infravermelho próximo. Esse índice permite a distinção entre água e áreas construídas, pois atribui valores negativos às regiões construídas quando empregada a banda do infravermelho médio. Além disso, ele pode realçar de maneira mais marcante as áreas de solo, que exibem maior refletância na banda do infravermelho médio do que no infravermelho próximo. Dessa forma, o MNDWI oferece uma representação mais detalhada dos corpos d'água em comparação com o NDWI, o que resulta em uma notável melhoria na diferenciação entre os elementos "água" e "não-água".

Para a confecção dos mapas de MNDWI em 24/06/2013 e 02/09/2021, foram utilizadas as bandas espectrais B3 – visível verde (comprimento de onda: 0,53 – 0,59 µm) e B6 - Infravermelho Médio (comprimento de onda: 1,57 – 1,65 µm), ambas com resolução espacial de 30 m. O cálculo processado (Equação 3), utilizando a ferramenta “calculadora raster” do software de livre acesso QGIS (Xu, 2006, Nascimento et al., 2018, Santos Filho et al., 2021).

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{SWIR 1}}{\text{Green} + \text{SWIR 1}} \quad (3)$$

em que:

MNDWI é o índice de água modificado;

Green é a reflectância para banda do visível verde;

SWIR 1 é a reflectância para a banda do infravermelho médio.

Para o cálculo da reflectância de cada banda utilizada, aplicou-se a Equação 2, de acordo com a USGS (2023). Após o processamento das imagens do índice, o raster foi convertido em formato vetorial para calcular as áreas delimitadas dos corpos hídricos

indicados na Figura 3 em ambas as datas e a variação entre elas. O processo envolveu a geração de uma imagem binária (recursos hídricos e não hídricos) utilizando a ferramenta “calculadora raster” do QGIS, com o MNDWI removendo todos os pixels com valores menores que zero. Dessa forma, apenas os pixels relacionados ao corpo d'água permaneceram. Em seguida, no próprio QGIS, o raster binário foi transformado em dados vetoriais (poligonização) e as feições principais dos corpos hídricos foram selecionadas para determinar a área superficial.

#### Dados pluviométricos e de temperatura do ar

Foram analisados dados do monitoramento de pluviômetros instalados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, disponibilizados de forma *online*, a fim de entender o comportamento pluviométrico da região. Utilizou-se a média entre os postos pluviométrico de Salgueiro (8), Salgueiro (CHESF) (39) e Salgueiro – PCD (348), sendo analisados os anos de 2013, 2017 e 2021, com o objetivo de entender o comportamento pluviométrico da região no início, meio e final deste período, conforme detalhado na Figura 4. Dos acumulados mensais, observa-se que os maiores valores ocorrem nos primeiros meses do ano (período chuvoso), enquanto para a precipitação acumulada anual, observou-se 374,15 mm (2013), 313,3 mm (2017) e 534,3 mm (2021), sendo possível observar um cenário de escassez hídrica na região para o período de 2013 até 2017, com melhoramento entre 2017 até 2021.

Ao analisar mensalmente, observa-se, também, diferenças na distribuição de ocorrência ao longo do ano, uma vez que para um mesmo mês foram encontrados valores diferentes, como por exemplo no mês de janeiro, que apresentou valores de intensidade pluviométrica de 90,2 mm e 11,3 mm para os anos de 2013 e 2017, assim como de 22,45 mm para 2021.

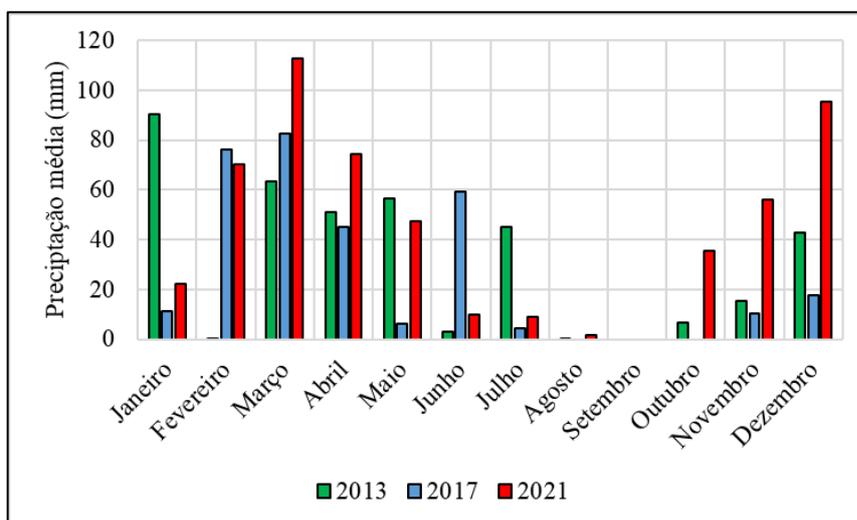


Figura 4 - Dados pluviométricos da PCD de Salgueiro-PE para os anos 2013, 2017 e 2021. Fonte: APAC (2023).

Os dados de temperatura média do ar de Salgueiro-PE para o ano de 2021 foram coletados do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizados de forma *online*. A estação automática escolhida foi a [A370] SALGUEIRO-PE, localizada nas coordenadas de latitude: -8.06 e longitude: -39.10. Para o ano de 2013, não foram encontrados dados disponíveis na mesma estação. Sendo assim, a estação com dados mais próximos ao

ano de 2013 e também mais próxima da área de estudo encontrada foi a PCD 32030 - ESTAÇÃO: Salgueiro/PE, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada nas coordenadas de latitude: -8.067 e longitude: -39.140. Os dados coletados da PCD 32030 corresponderam ao ano de 2012. A Figura 5 apresenta os valores de temperatura média do ar nos anos de 2012 e 2021.

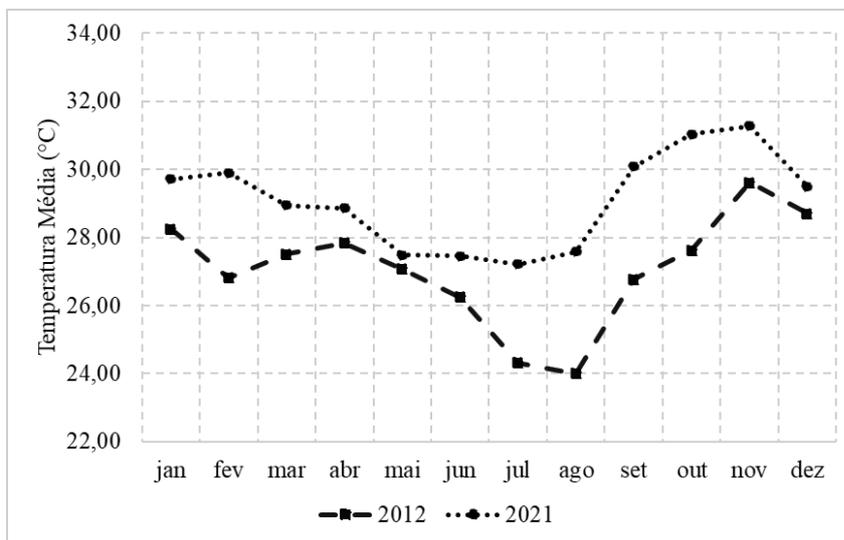


Figura 5 - Temperatura média do ar nos anos de 2012 e 2021. Fonte: INMET e INPE (2023).

### 3. Resultados e discussão

#### Urbanização

A Figura 6 detalha a caracterização da ocupação do solo para os anos de 2013 e 2021 para a

área total do município de Salgueiro. Observa-se como principais tipologias, a formação Savânica, formação Campestre e pastagem, mostrando que em aspectos gerais, o município tem como principal característica predominante na maior parte de seu território as tipologias permeáveis.

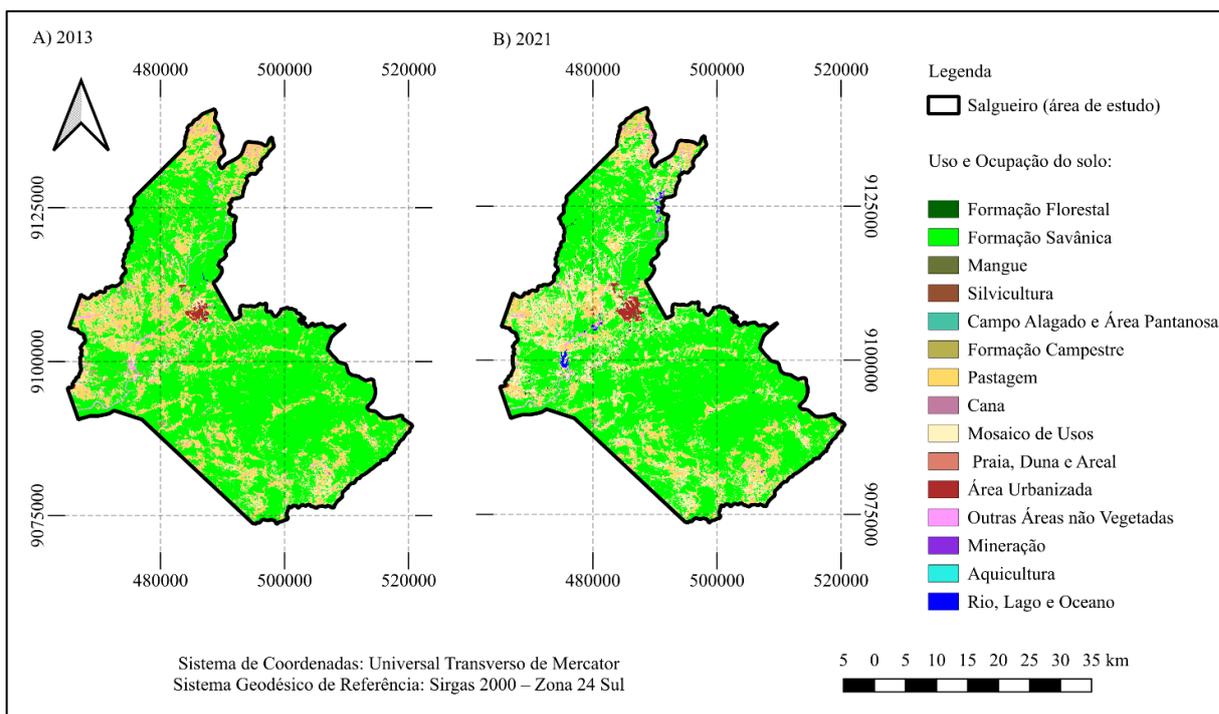


Figura 6 - Uso e ocupação do solo para Salgueiro-PE entre os anos de 2013 e 2021.

Contudo, observam-se modificações em relação a tipologia “Área Urbanizada”, com um aumento de aproximadamente 42%, ao comparar o somatório das áreas urbanizadas entre os anos de estudo, concentrados na área associada. De acordo com IBGE (2022), o município conta com 80,9% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização, 62,8% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, e 2,4% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada, ou seja, com presença de sistema de drenagem urbana.

Já com maior atenção para tipo “Rio, Lago e Oceano”, observou-se um crescimento de cerca de 80% entre os anos de 2013 e 2021. Justifica-se tal situação pela escassez de água na região semiárida de Pernambuco no ano de 2013, no qual sobre isso, Santos e Farias (2017) analisaram a relação com o abastecimento de água dos 1113 municípios

localizados dessa região, distribuídos em nove Estados, incluindo Pernambuco, e observaram que o sistema de distribuição pública de água cobre apenas 60% da população, distribuindo água nove e cinco dias por mês para os moradores das áreas urbanas e rurais, respectivamente. Complementarmente, vale citar, também como possível contribuição para o crescimento da água referente aos corpos hídricos, o aumento na urbanização nas bacias de contribuição desses corpos hídricos, influenciam no aumento do escoamento superficial, visto que se têm a substituição de uma superfície permeável para impermeável.

Outra forma eficiente de averiguar no mapeamento da expansão urbana é através das cartas georreferenciadas de NDVI nos anos pesquisados. A Figura 7 detalhou o NDVI gerado a partir do processamento das imagens de satélite OLI Landsat 8 para os anos de 2013 e 2021.

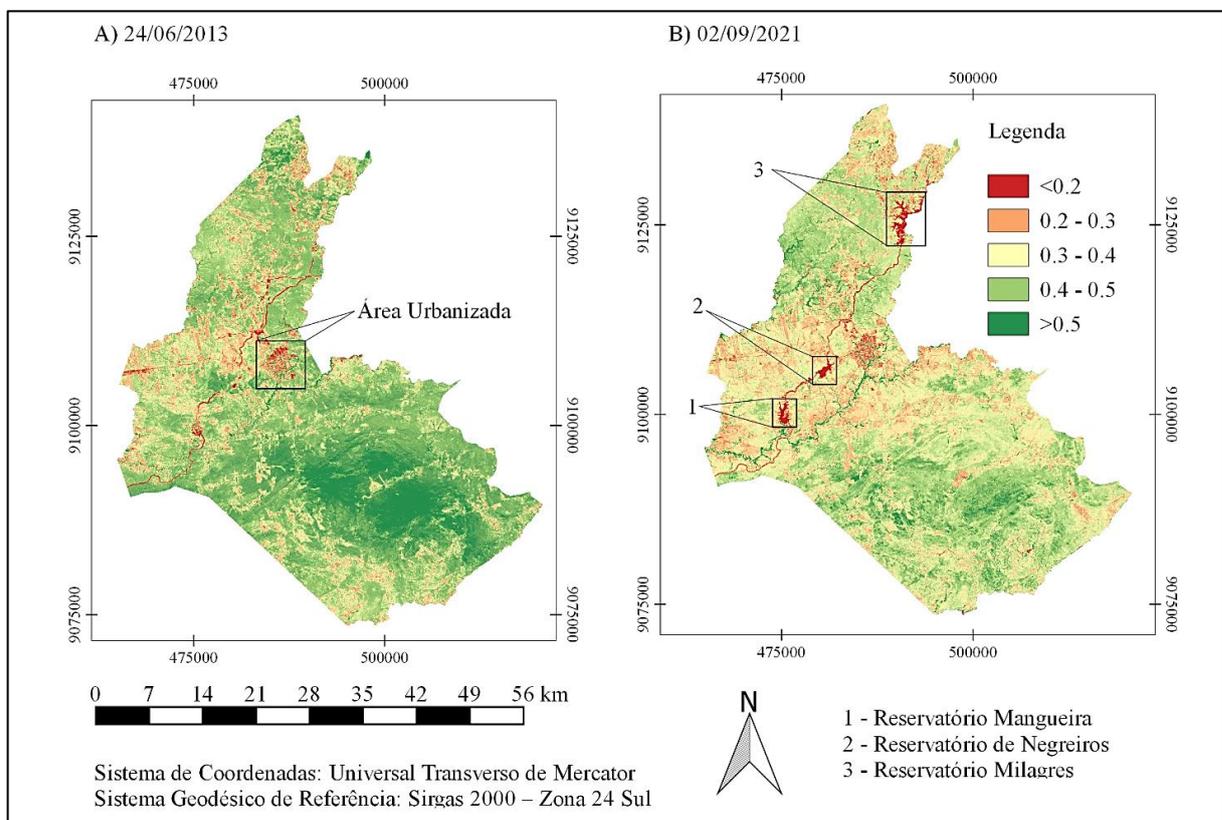


Figura 7 - Mapas de NDVI para os anos de 2013 e 2021.

De acordo com Liu (2006), as classes de NDVI com valores maiores que 0,33 correspondem a áreas de pastagem, vegetação moderadamente sadia, vegetação densa e vegetação sadia, enquanto que valores de NDVI menores que esse, representam áreas com o uso do solo relacionado a cursos de água, neve, concreto, asfalto, solo exposto e vegetação doente.

Ao avaliar o NDVI (Figura 7), é possível observar o crescimento da área urbanizada devido ao aumento das áreas vermelhas no mapa. Luz et al. (2019), avaliando a expansão urbana em Rio das

Ostras-RJ, afirmaram que o NDVI foi eficiente no mapeamento do crescimento da área urbana.

Também foi possível notar que entre os anos de 2013 e 2021, há o surgimento de novos reservatórios representados na cor vermelha. Trata-se dos reservatórios de Mangueira, Negreiros e Milagres que fazem parte do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) e foram criados visando a garantia do abastecimento de água nas regiões que sofrem com a escassez de recursos

hídricos (IBAMA, 2017). Almeida et al. (2020), em seus estudos, detectaram que as áreas correspondentes a valores de NDVI menores que zero, indicaram a presença de corpo hídrico representado pelo reservatório de Poço da Cruz em Pernambuco.

Com relação a vegetação, houve uma diminuição nas áreas sinalizadas pela cor verde mais escura. Isso pode estar relacionado à data de aquisição das imagens, onde o mês do ano de 2013 foi junho, indicando o final do período chuvoso e o mês do ano de 2021 foi setembro, no qual ocorre o período seco, como detalhado na Figura 4. Tal comportamento de alteração no mapeamento da vegetação devido a influência de eventos chuvosos também foi detectado por Almeida et al. (2020) no Perímetro Irrigado do Moxotó.

#### Modificações nos corpos hídricos urbanos

Os quatro principais corpos hídricos identificados na área urbanizada de Salgueiro – PE para os anos de 2013 e 2021 foram georreferenciados

na Figura 8. Destaca-se que os valores positivos (cor azul) representam as águas superficiais em ambientes de zona úmida, permitindo, assim, medir a extensão de água superficial de cada ano. Segundo Ali et al. (2019), o MNDWI se mostra como um dos métodos mais precisos para detecção, medição e monitoramento de corpos hídricos em áreas urbanas, isso decorre da possibilidade de o MNDWI aglomerar em duas classes áreas referentes a com água e sem água.

Para melhor identificação dos principais corpos hídricos urbanos da cidade de Salgueiro escolhidos para este estudo, a Figura 8A apresentou uma imagem de satélite do Google Earth com a indicação e numeração de cada massa de água. Os corpos hídricos identificados pelo MNDWI foram validados e nomeados através do Google Earth. Não foram encontradas informações a respeito do nome dos corpos hídricos 2 e 4, sendo assim, eles foram identificados nesse estudo como Corpo Hídrico 2 e Corpo Hídrico 4.

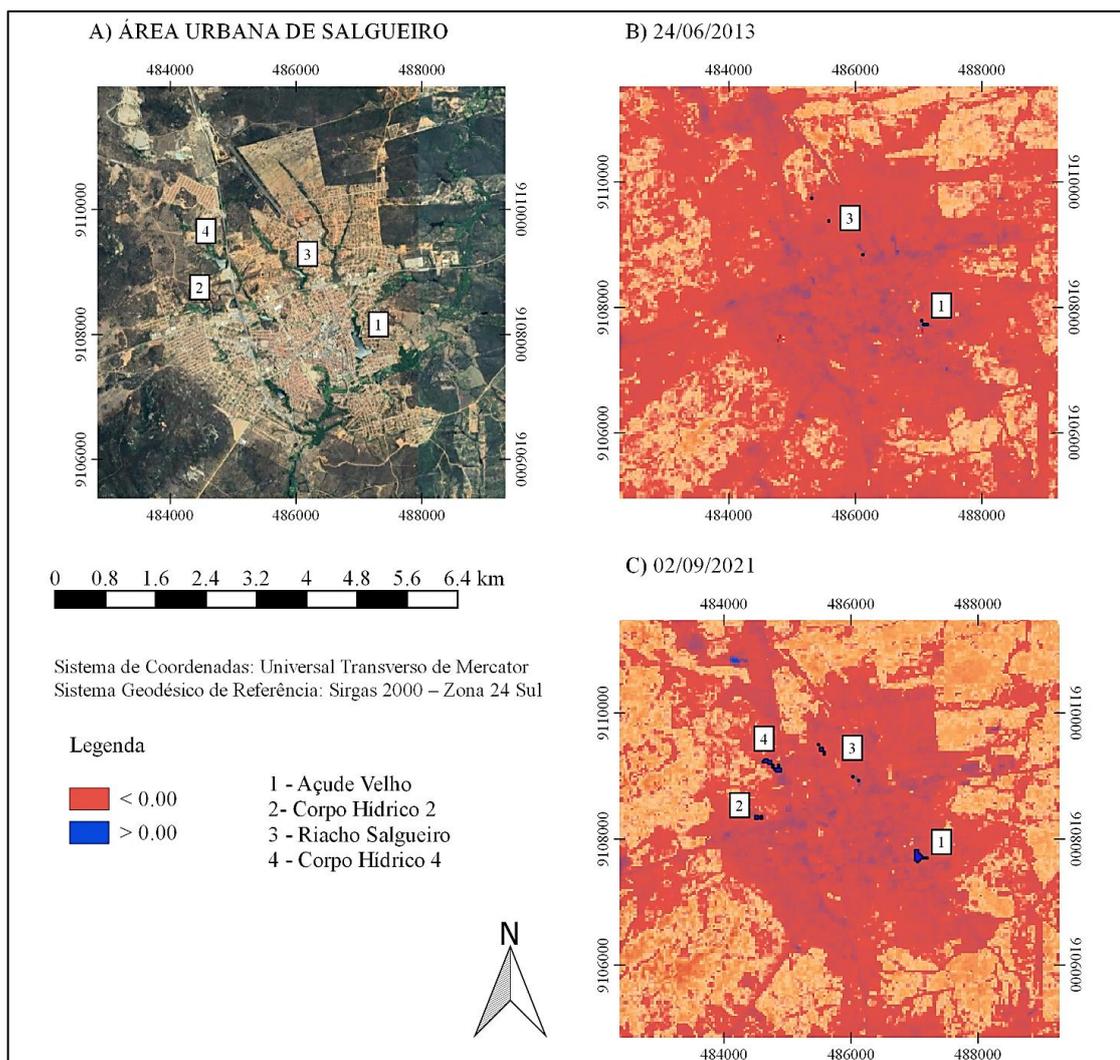


Figura 8 - Cartas georreferenciadas do MNDWI com os principais corpos hídricos na área urbanizada de Salgueiro-PE em 24/06/2013 e 02/09/2021.

Notou-se que no ano de 2013 (Figura 8B), o Corpo Hídrico 2 e o Corpo Hídrico 4 não conseguiram ser facilmente identificados pelo MNDWI. Uma justificativa para que isso tenha ocorrido pode ser devido ao fato do corpo hídrico estar possivelmente seco, e assim, não haver a presença de água ou apresentar água em pouca quantidade onde a escala do MNDWI não conseguiu detectar. No ano de 2021 (Figura 8C), os quatro principais corpos hídricos

foram identificados e apresentaram áreas superficiais mais significativas que o ano de 2013.

A Tabela 1 apresenta a análise comparativa entre as áreas dos espelhos d'água para os principais corpos hídricos identificados na área urbanizada de Salgueiro – PE para os anos de 2013 e 2021, com resultados indo de acordo com a condição encontrada na Figura 8, com aumento da área do espelho d'água entre 2013 e 2021.

**Tabela 1** - Área dos principais corpos hídricos na área urbanizada de Salgueiro-PE (2013 e 2021).

ANO	Área dos corpos hídricos (m <sup>2</sup> )			
	Açude Velho	Corpo Hídrico 2	Riacho Salgueiro	Corpo Hídrico 4
2013	3.600,00	0,00	2.700,00	0,00
2021	19.800,00	5.400,00	8.100,00	18.000,00

Os aumentos mais significativos na área superficial ocorreram no Açude Velho que foi de 3.600 m<sup>2</sup> para 19.800 m<sup>2</sup> e no Corpo Hídrico 4 que foi de 0 m<sup>2</sup> para 18.000 m<sup>2</sup>. Esse resultado corrobora com a ideia de que o crescimento da urbanização nas áreas de captação dessas massas de água contribui para uma maior geração de escoamento superficial em virtude do aumento de áreas impermeáveis, como também a influência significativa do regime pluviométrico nos anos em questão.

Bhunja (2021) utilizou o MNDWI em seu estudo para analisar a mudança em corpos d'água superficiais durante o período de 1990 a 2018. O autor relatou que o índice demonstrou uma eficácia significativa no monitoramento em relação a outros índices estudados, oferecendo uma avaliação precisa das águas superficiais. Isso evidenciou o aumento contínuo na extensão da área da superfície aquática do corpo hídrico em estudo ao longo dos anos.

Os resultados apresentados estão em consonância com os dados de precipitação aferidos para região (Figura 4). O ano de 2013 apresentou uma maior quantidade de áreas consideradas secas, com maior registro de pontos na cor vermelha (Figura 8B), que representa os valores mais baixos quando comparado com o ano de 2021 (Figura 8C). Somado a isso, para os resultados positivos, responsáveis por caracterizar áreas úmidas, têm-se também menores incidências em 2013, uma vez que se têm menos pontos na cor azul ao comparar com 2021.

#### *Temperatura Média do Ar*

Buscando identificar a existência de uma correlação entre o crescimento da urbanização e o aumento das temperaturas, procurou-se analisar o banco de dados de temperatura média do ar do

município de Salgueiro-PE coletados da estação automática [A370] Salgueiro-PE do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o ano de 2021 e, da estação PCD 32030 - ESTAÇÃO: Salgueiro/PE, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o ano de 2012. A Figura 5 apresentou os dados coletados. Observou-se que na maioria dos meses houve um aumento significativo nos valores de temperatura média do ar no município ao longo dos anos. O ano de 2021 mostrou-se mais quente que o ano de 2012, corroborando com a possível relação entre o aumento da urbanização e, conseqüentemente, das temperaturas do ar.

Galdino e Ferreira (2023), estudando a qualidade ambiental das pequenas cidades da Microrregião de Goioerê - Paraná, constataram que ela foi afetada pelas mudanças de uso da terra ao longo dos anos. As autoras concluíram que áreas com baixa ou nenhuma cobertura vegetal apresentaram maiores temperaturas de superfície, como geralmente é o caso de áreas urbanas onde é difícil haver a manutenção de áreas verdes para a preservação da qualidade ambiental.

De acordo com Rosa e Filho (2023), a expansão da urbanização tem gerado mudanças nas condições ambientais devido ao aumento da frota de veículos, transformação de solos naturais em superfícies impermeáveis, retificação de cursos d'água, supressão de vegetação arbórea, entre outros fatores. Como resultado desse processo, a substituição da vegetação natural pelo ambiente urbano gerou um incremento nas temperaturas dos núcleos urbanos. Segundo os autores, as áreas centrais, que possuem menor índice de vegetação, da cidade de Rio Paranaíba-MG, apresentaram níveis de temperatura do ar maiores do que as áreas mais extremas da cidade onde a presença de cobertura vegetal é maior.

#### 4. Conclusão

O presente trabalho buscou entender a relação entre a variabilidade da expansão urbana, a temperatura média do ar e a área superficial de corpos hídricos pertencentes ao município de Salgueiro-PE, analisando a variação do uso e ocupação do solo, assim como a modificação em áreas vegetadas e em espelhos d'água dos principais recursos hídricos urbanos utilizando técnicas de sensoriamento remoto.

A aplicação das técnicas de SR na avaliação da evolução ao longo do tempo da cobertura vegetal e da quantificação dos espelhos d'água de corpos hídricos foi conduzida de maneira ágil, prática e eficaz por meio do software de livre acesso QGIS. A utilização de imagens georreferenciadas para o cálculo dos índices biofísicos, NDVI e MNDWI, produziu resultados congruentes tanto na avaliação do uso e ocupação do solo quanto nos corpos hídricos.

A avaliação de imagens provenientes da Coleção 7 do *MapBiomias* e dos mapas de NDVI constataram o aumento de 42% na área urbanizada do município, entre os anos de 2013 e 2021, se mostrando condizente com os resultados do Censo 2022 do IBGE, onde houve o aumento de 10,14% no número de habitantes em comparação com o último Censo de 2010. Em consonância, os dados de temperatura média do ar evidenciaram que houve aumento nos valores dos últimos anos, corroborando com a existência de uma correlação entre o crescimento da urbanização e o aumento nas temperaturas.

A análise das áreas superficiais dos principais corpos hídricos urbanos aplicando o MNDWI, constatou que em todos os espelhos d'água estudados houve um aumento na área superficial. Esse aumento pode estar relacionado com o crescimento da urbanização nas bacias de contribuição desses corpos hídricos que acaba gerando maior escoamento superficial, em virtude da consequente impermeabilização do solo, como também pode ter relação com a intensidade da pluviometria no ano de 2021 que foi mais significativa do que no ano de 2013 no período de estudo das imagens escolhidas.

Com isso, a metodologia utilizada apresentou-se com eficiência e baixo custo na identificação de alterações na quantidade de água em corpos hídricos e modificações em cenários urbanos, podendo ser reproduzida em outras áreas de interesse.

A utilização conjunta da representação da temperatura, da cobertura vegetal e dos corpos hídricos dentro do perímetro urbano revelou-se altamente vantajosa para orientar o planejamento urbano e facilitar a tomada de decisões visando o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de uso do solo. A aplicação de geoprocessamento em conjunto com a combinação de análise de temperatura do ar e NDVI tem o potencial de fornecer aos administradores

ferramentas para mitigar e controlar as ilhas de calor urbanas, ajudando a identificar as melhores áreas para implantar praças, parques, zonas de preservação e fragmentos florestais. Estudos desse tipo também podem estimular a adoção de medidas mitigadoras, como telhados verdes, aumento da arborização urbana e desenvolvimento de espaços verdes em residências e estabelecimentos comerciais, entre outros. Essas intervenções contribuem para a criação de um ambiente mais agradável e, conseqüentemente podem melhorar a qualidade de vida. A vegetação não apenas influencia positivamente na regulação da temperatura, mas também contribui para a redução da poluição e do ruído, equilíbrio hídrico e oferta de abrigo para animais, como aves, ao mesmo tempo em que cria espaços recreativos.

#### 5 Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de Mestrado da primeira autora (Processo nº IBPG-0922-3.01/22) e ao projeto APQ-1535-3.01/22 - Ecotecnologias inovadoras para manejo sustentável das águas pluviais urbanas; ao *United States Geological Survey* (USGS); ao *MapBiomias* pela disponibilização das imagens de satélite; à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pelo banco de dados hidrológicos; ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo fornecimento dos dados de temperatura média do ar e ao Projeto Sensoriamento remoto aplicado no delineamento espaço-temporal de corpos hídricos e áreas verdes no Semiárido brasileiro.

#### Referências

- Ali, M.I., Dirawan, G.D., Hasim, A.H., Abidin, M.R., 2019. Detection of changes in surface water bodies urban area with NDWI and MNDWI methods. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, v. 9, 946-951.
- Almeida, D.N.O., Santos, M.B., Souza, A.M.P., Barros, J.P.M., Oliveira, L.M.M., 2020. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) aplicado no mapeamento de corpo hídrico e vegetação. In: *Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Caruaru. Anais [...]. Caruaru: ABRHidro, p. 1-10.
- Almeida, D.N.O., Araújo, D.C.S., Soares, D.R., Maia, F.M.A., Montenegro, S.M.G.L., Santos, S.M., Oliveira, L.M.M., 2023. Delimitation of water areas using remote sensing in Brazil's semiarid. *Brazilian Journal of Environmental Sciences - RBCIAMB*, v. 58, 20 – 29.

- Andrade, Y.P., Santos, J.S.A., Rêgo, R.M., 2021. Avaliação Pós-Ocupação Ambiental No Conjunto Residencial Santo Antônio – Salgueiro-PE. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 10. 303-325.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2023. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- Braz, A.M., Kunkel, A.C., Boni, P.V., Braz, A.M., Martins, A.P., 2018. Áreas verdes e temperatura da superfície na cidade de Três Lagoas/MS. *Revista Formação (online)*, v. 25, maio-ago, p. 93-122.
- Becker, P., 2016. Utilização do Sig no Cadastro da Rede de Macrodrenagem e Microdrenagem. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 7 p.
- Bezerra, P.T.C., 2009. A Influência Da Urbanização No Clima Das Cidades De Petrolina/PE E Juazeiro/BA. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 123 p.
- Bhunja, G.S., 2021. Assessment of automatic extraction of surface water dynamism using multi-temporal satellite data. *Earth Sci Inform*, v. 14, 1433–1446.
- Coelho, F.N., 2016. Aplicação de técnica de fusão em imagens Landsat 8 / TIRS para o mapeamento de temperatura de superfície em perímetros urbanos, no município de Várzea Grande, Mato Grosso. Monografia UNIVAG - Centro Universitário, Várzea Grande – MT, 36 p.
- Cohen, W.B., Maieringer, T.K., Gower S.T., Turner, D.P., 2003. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 561-571.
- Costa, J., Poletto, C., Ramme, S.S., 2016. Redução e retardo do escoamento superficial das águas pluviais em telhado verde. Encontro de Iniciação Científica. Toledo, PR, Brasil, 13 p.
- De Paulo, F.L., Quirino, A.M.S., 2014. Gestão urbana e arborização das cidades: diagnóstico qualitativo e quantitativo no município de Salgueiro, Pernambuco, Brasil. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 10.
- Farias, M.O., Candeias, A.L.B., Oliveira, L.M.M., Almeida, D.N.O., Tavares Junior, J.R., 2017. Variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo por índices de vegetação e água no agreste Pernambucano. *Revista Brasileira de Agrotecnologia*, v. 7, 91-99.
- Filgueiras, R., Nicolette, D.A.P., Carvalho, T.M., Cunha, A.R., Zimback, C.R.L., 2016. Predição da temperatura do ar por meio de sensoriamento remoto orbital. *Revista Brasileira de Cartografia*, 1485-1495.
- Freitas, L.C.S., Cavalcanti, L.C.S., Braz, A.M., 2023. Avaliação da Acurácia das Classes de Uso e Cobertura da Terra do Mapbiomas (Coleção 61) Para O Município De Carpina (PE). *Caderno Prudentino de Geografia*, v. 45, 38-52.
- Galdino, S.J., Ferreira, M.E.M.C., 2023. Análise de NDVI e temperatura de superfície em áreas urbanas de pequenas cidades da microrregião de Goioerê-PR. *Revista Percurso – NEMO*, v. 15, n.1, p. 25-51.
- GOOGLE EARTH. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- Gordon, L.J., Steffen, W., Jönsson, B.F., Folke, C., Falkenmark, M., Johannesen, Å., 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 102, 7612-7617.
- Holanda, A.S.S., Guerra, C.E., 2010. Monitoramento Da Vegetação Da Região Do Eixo-Forte No Município De Santarém-PA Utilizando Imagens Dos Índices De Vegetação NDVI E NDWI. In *Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Pará, Nov, v. 1, 001-005.
- IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2023. Consulta pública sobre Pacuera do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/informes/consulta-publica-pisf>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Censo Demográfico 2022. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- INMET, Instituto Brasileiro de Meteorologia. Mapa de Estações Meteorológicas, 2023. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Dados Históricos, 2023. Disponível em: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/passos2.php>. Acesso em: 15 set. 2023.
- Liu, W.T.Y., 2006. Aplicações de sensoriamento remoto. 2ed. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 102 p.
- Luz, L.B., Rodigheri, G., Oliveira, M.A., Aquino, J.N., Mendes, A.P.S.F., Gameiro, S., Schaparin, L.P., Rodigheri, M., 2019. Utilização do NDVI e NDBI para avaliação da expansão urbana no município do Rio das Ostras - RJ, utilizando a plataforma Google Earth Engine. In: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*,

- Santos. Anais eletrônicos, São José dos Campos, INPE.
- Nascimento, E.F., Oliveira, L.M.M., Bezerra, U.A., Almeida, D.N.O., Azevedo, L.S., 2018. Variabilidade temporal do espelho d'água do reservatório Entremontes - Pernambuco utilizando sensoriamento remoto. In: MEIO AMBIENTE EM FOCO, 9., 2018, Recife. Resumos [...]. Recife: MAF.
- MapBiomas, Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da terra do Brasil, 2022. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em 22 de agosto de 2023.
- Meireles, F.M., 2023. "O Planejamento Urbano na Gestão de Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas". Revista Pleiade, Centro Universitário Descomplica UniAmérica, 17 (38), 05–12.
- Pernambuco, 2022. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH/PE). Secretaria Executiva de Recursos Hídricos, Recife, Seinfra, v. 4, Diagnóstico Integrado, 299 p.
- Rosa, H.A., Filho, R.F.F., 2023. Influência da vegetação na temperatura da superfície em áreas urbanas por meio de imagens do satélite Landsat 8. E&S - Engineering and Science, v. 12, 1-18.
- Santos Filho, H., Cornero, C., Pereira, A., 2021. Comparação ótica de NDWI e classificação não supervisionada com resultados de detecção automática de áreas úmidas: estudo de caso de Macapá, Brasil. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7. 40452-40468.
- Santos, S.M., Farias, M.M.M.W. E.C., 2017. Potential for Rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 164, p. 1007 – 1015.
- Silva Júnior, U.J., Gonçalves, R., Oliveira, L.M.M., Silva Júnior, J.A., 2021. Sensibilidade Espectral dos Índices de Vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, v. 73.
- Song, X.P., Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Tyukavina, A., Vermote, E.F., Townshend, J.R., 2018. Global land change from 1982 to 2016. Nature, v. 560, n. 7720, p. 639-643.
- USGS, United States Geological Survey. Landsat Missions. Catálogo USGS, 2023. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 18 ago. 2023.
- USGS - A, United States Geological Survey. Landsat Missions, 2023. Como posso usar um fator de escala com produtos científicos Landsat Nível 2? Disponível em: <<https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- Xu, H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote sensing, v. 27, 3025-3033.