



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MATO GROSSO DO SUL**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE TRÊS LAGOAS**

CECÍLIA HANAKO GONÇALVES MARTINS RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA DE TRÊS
LAGOAS UTILIZANDO NDBI E NDVI COM DADOS LANDSAT NO
GOOGLE EARTH ENGINE**

Três Lagoas – MS

2024

CECÍLIA HANAKO GONÇALVES MARTINS RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA DE TRÊS
LAGOAS UTILIZANDO NDBI E NDVI COM DADOS LANDSAT NO
GOOGLE EARTH ENGINE**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Geografia do Campus de Três Lagoas da Universidade
Federal de Mato Grosso do Sul como requisito para a
obtenção do título de Licenciatura em Geografia.
Orientador: Prof. Dr. Vitor Mateus Bacani.

Três Lagoas – MS

2024

CECÍLIA HANAKO GONÇALVES MARTINS RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO DA MALHA URBANA DE TRÊS
LAGOAS UTILIZANDO NDBI E NDVI COM DADOS LANDSAT NO
GOOGLE EARTH ENGINE**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Geografia do Campus de Três Lagoas da Universidade
Federal de Mato Grosso do Sul como requisito para a
obtenção do título de Licenciatura em Geografia.
Orientador: Prof. Dr. Vitor Mateus Bacani.

Este de Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
Licenciatura e aprovado em sua forma final pelo curso de Geografia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Matheus Bacani

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul –
UFMS/CPTL
Examinador/Presidente

Prof. Dr Frederico dos Sanos Gradella

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Examinador

Prof. Me. Bruno Henrique Machado da Silva
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Examinador

Para meu pai, cujos pedidos de ‘atualizações sobre o TCC’ eram mais frequentes que minhas visitas à biblioteca. Sua fé na minha capacidade foi o empurrão que eu precisava. Esta dedicatória é um pequeno agradecimento por tudo, inclusive pelas piadas ruins que me distraíram nos momentos certos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional, pela paciência e por acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais difíceis. Este trabalho só foi possível graças ao incentivo e à força que recebi ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, pela dedicação, paciência e pelas valiosas orientações que me ajudaram a trilhar este caminho com mais segurança e confiança. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores do curso de Geografia, que ao longo da minha formação acadêmica compartilharam seus conhecimentos e experiências, contribuindo significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas e amigos, por todo o apoio, as discussões construtivas e as trocas de ideias, que enriqueceram minha trajetória e tornaram o percurso mais leve e agradável.

À instituição de ensino e aos laboratórios que proporcionaram os recursos necessários para a realização deste trabalho, oferecendo o suporte técnico e logístico imprescindível para as análises realizadas.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, incentivando a busca pelo conhecimento e pela preservação ambiental, pilares fundamentais para a construção de um futuro sustentável.

RESUMO

A expansão urbana desordenada tem sido associada a impactos severos ao meio ambiente, especialmente em municípios que apresentam rápido crescimento, como Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. Neste estudo, analisou-se a relação entre o crescimento urbano e a cobertura vegetal ao longo das últimas três décadas, buscando preencher lacunas acerca dos efeitos ambientais gerados pela industrialização na região. Partiu-se da hipótese de que a expansão das áreas construídas estaria diretamente relacionada à redução das áreas vegetadas. Os procedimentos metodológicos adotados neste estudo fundamentaram-se na aplicação dos índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), obtidos a partir de imagens Landsat processadas na plataforma Google Earth Engine. A relação entre a cobertura vegetal e a expansão urbana em Três Lagoas foi investigada por meio da aplicação da Correlação de Pearson e do Coeficiente de Determinação (R^2). Os resultados evidenciaram uma correlação negativa significativa entre NDVI e NDBI, indicando que a industrialização, intensificada após 2010, impulsionou a expansão das áreas construídas em detrimento da vegetação. Concluiu-se que a implementação de um planejamento urbano sustentável é imprescindível para equilibrar o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade em Três Lagoas.

Palavras-chave: Sustentabilidade, industrialização, cobertura vegetal, imagens de satélite, planejamento ambiental.

ABSTRACT

Unregulated urban expansion has been associated with significant environmental impacts, particularly in municipalities experiencing rapid growth, such as Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. This study analyzed the relationship between urban growth and vegetation cover over the past three decades, aiming to address gaps in understanding the environmental effects of industrialization in the region. The hypothesis proposed that expanding built-up areas is directly related to reducing vegetated areas. The methodological procedures adopted in this research were based on applying the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDBI (Normalized Difference Built-up Index), derived from Landsat imagery processed on the Google Earth Engine platform. Pearson's Correlation was also applied to evaluate the association between urban expansion and vegetation loss. The results revealed a significant negative correlation between NDVI and NDBI, indicating that industrialization, which intensified after 2010, drove the growth of built-up areas at the expense of vegetation. It was concluded that implementing sustainable urban planning is essential to balance economic development with environmental preservation, providing a foundation for public policies aimed at sustainability in Três Lagoas.

Keywords: Sustainability, industrialization, vegetation cover, satellite imagery, environmental planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2– Análise temporal do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para as décadas de 1990, 2010 e 2020.	21
Figura 3- Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 1990	Erro! Indicador não definido.
Figura 4– Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2010.	Erro! Indicador não definido.
Figura 5– Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2020.	Erro! Indicador não definido.
Figura 6– Análise temporal do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para as décadas de 1990, 2010 e 2020.	24
Figura 7– Análise temporal expandida do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 1990.	Erro! Indicador não definido.
Figura 8– Análise temporal expandida do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2010.	25
Figura 9– Análise temporal expandida do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2020.	Erro! Indicador não definido.
Figura 10– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 1990.	28
Figura 11– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 2010.	Erro! Indicador não definido.
Figura 12– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 1990.– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 2020..	Erro! Indicador não definido.
Figura 13– Variação temporal da média do NDVI por década em Três Lagoas, MS, destacando a redução da cobertura vegetal entre as décadas de 1990, 2010 e 2020.	Erro! Indicador não definido.
Figura 14- Variação temporal da média do NDBI por década em Três Lagoas, MS, indicando o aumento das áreas construídas e impermeabilizadas entre as décadas de 1990, 2010 e 2020.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 15- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 1990, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 2010 e 2020.	Erro! Indicador não definido.
Figura 16- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 2010, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 1990 e 2020.	33
Figura 17- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 2020, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 1990 e 2010.	Erro! Indicador não definido.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Sensoriamento Remoto na Análise da Expansão Urbana	13
2.2 Google Earth Engine como Ferramenta para Estudos Urbanos.....	14
2.3 Impactos Ambientais da Expansão Urbana	14
3. METODOLOGIA	16
3.2 Ferramentas Utilizadas	17
3.3 Procedimento metodológico	17
3.4 Delimitação da Área de Estudo.....	18
3.5 Coleta e Processamento de Dados	18
3.6 Aplicação dos Índices NDVI e NDBI.....	19
3.7 Análise Temporal e Classificação.....	19
3.8 Análise de Correlação	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Correlação de Pearson e Coeficiente de Determinação entre NDVI e NDBI	27
4.2 Comparação Temporal e Impactos na Dinâmica Ambiental	30
4.3 Análise Detalhada das Direções da Expansão Urbana de Três Lagoas	32
4.3.1 Crescimento em Direção ao norte.....	34
4.3.2 Crescimento em Direção ao sul	35
4.3.3 Crescimento em Direção ao leste.....	35
4.3.4 Crescimento em Direção ao oeste.....	35
4.4 Implicações para o Planejamento Urbano e Sustentabilidade.....	36
4.5 Discussão dos Impactos Ambientais.....	37
5. CONCLUSÕES	38
6. REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

Globalmente, a expansão urbana se aumenta caracterizando uma preocupação intensificada pela população e pela industrialização, gerando desafios significativos em termos de planejamento e preservação ambiental (Seto et al., 2012). A análise desse resultado por meio de índices espectrais, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDBI (Normalized Difference Built-up Index), tem permitido avanços importantes na compreensão das transformações no uso do solo urbano, sendo amplamente utilizado em estudos que buscam monitorar a expansão urbana e a manipulação ambiental associada (Zha et al., 2003; Ghosh et al., 2019).

Por exemplo, Huang et al. (2020) apresentou a eficácia desses índices para avaliar a perda de crescimento e o aumento de áreas construídas em regiões com desenvolvimento avançado. Kaya e Dervişoğlu (2020) também aplicaram NDVI e NDBI para monitorar a urbanização em Istambul, monitorando a redução das áreas vegetadas e a intensificação das zonas urbanas. Da mesma forma, Luz et al. (2019) demonstraram o impacto do crescimento urbano na vegetação nativa ao aplicar esses índices para mapear as mudanças em Rio das Ostras, no Brasil, reforçando a importância desses métodos para o planejamento urbano sustentável.

O NDVI, que mensura a densidade de vegetação com base na diferença de refletância entre os comprimentos de onda do infravermelho próximo e do vermelho, é amplamente utilizado para detectar mudanças em áreas naturais. Já o NDBI, projetado para destacar áreas urbanizadas, ajuda a distinguir essas regiões das não urbanas, como discutido por Oliveira et al. (2021) em estudos aplicados no Brasil.

Em um contexto de rápida urbanização, o desenvolvimento econômico de Três Lagoas está intimamente ligado a sua localização estratégica, abundância de recursos hídricos e políticas públicas de incentivo à industrialização. A cidade emergiu como um importante polo industrial, especialmente no setor de celulose e papel, devido à presença de grandes empresas que se beneficiam tanto da proximidade com os rios Paraná e Sucuriú, que fornecem água essencial ao processo industrial, quanto da sua posição como eixo logístico no Centro-Oeste brasileiro e o rápido crescimento urbano, impulsionado pela instalação de grandes indústrias e o desenvolvimento do agronegócio, resultou na conversão de áreas naturais para urbanas e agrícolas. Nesse contexto de expansão econômica e urbanização acelerada, o monitoramento por índices espectrais torna-se essencial para compreender e mitigar os impactos ambientais, promovendo um planejamento urbano mais sustentável (Gomes, 2020)

O uso de plataformas tecnológicas como o Google Earth Engine (GEE) tem sido um diferencial nesse campo de estudo. A plataforma oferece a capacidade de processar grandes volumes de dados geoespaciais, como imagens de satélites Landsat, de forma rápida e eficiente (Gorelick et al., 2017). Como discutido por Kaya e Dervişoğlu (2020), a integração de índices espectrais como o NDBI e o NDVI no GEE permite uma análise detalhada e automatizada da expansão urbana, facilitando a identificação de padrões de crescimento urbano em diferentes escalas temporais e geográficas.

No caso de Três Lagoas, o estudo da expansão urbana por meio desses índices pode fornecer descobertas relevantes sobre as áreas que mais cresceram e quais os impactos desse crescimento no ambiente natural. O trabalho de Oliveira et al. (2021) mostrou que esses índices podem ser usados para avaliar a eficiência do uso do solo, permitindo uma melhor visualização das áreas urbanizadas versus áreas vegetadas. Isso torna possível o desenvolvimento de estratégias de planejamento urbano que promovam a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais.

A relevância de se monitorar o crescimento urbano também se reflete na necessidade de políticas públicas que considerem os impactos ambientais dessa expansão havendo importância de integrar a análise da vegetação e das áreas urbanas para o desenvolvimento de cidades mais resilientes às mudanças climáticas e capazes de preservar a qualidade de vida de seus habitantes.

Portanto, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de uma análise detalhada da expansão urbana de Três Lagoas, utilizando o GEE, aliado aos índices NDVI e NDBI. Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir significativamente para o planejamento urbano sustentável da cidade, oferecendo subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão territorial

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a expansão da malha urbana de Três Lagoas nas décadas de 1990 (período pré- industrialização instensificada) e pós intensificação industrial (décadas de 2010 e 2020).

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Calcular e mapear os índices espectrais NDVI e NDBI para as décadas de 1990, 2010 e 2020, utilizando dados Landsat.
2. Analisar a variação temporal e espacial de NDVI e NDBI para identificar áreas de expansão urbana.
3. Identificar padrões e tendências na expansão urbana de Três Lagoas.
4. Avaliar a correlação entre os índices espectrais NDVI e NDBI, utilizando o Coeficiente de Pearson para medir a força da relação linear e o coeficiente de determinação para quantificar a explicação do modelo sobre a variação observada na expansão urbana de Três Lagoas nas décadas de 1990, 2010 e 2020.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A expansão urbana é um tema amplamente debatido no campo do planejamento territorial e das geociências, principalmente por seu impacto direto na estrutura socioambiental e econômica das cidades. A expansão urbana é um tema amplamente debatido no campo do planejamento territorial e das geociências, principalmente por seu impacto direto na estrutura socioambiental e econômica das cidades. Segundo Santos et al. (2021), o crescimento urbano afeta de maneira significativa a dinâmica ambiental social, exigindo soluções para promover um planejamento sustentável. Oliveira et al. (2021) também destacam que o rápido crescimento das áreas urbanas altera o uso do solo, influenciando tanto o meio ambiente quanto a qualidade de vida dos habitantes. Além disso, Luz et al. (2019) enfatizam a relevância de estudos geoespaciais para monitorar e planejar essas mudanças, a fim de minimizar os impactos negativos da expansão urbana.

Os métodos de sensoriamento remoto e análise de dados geoespaciais têm sido uma ferramenta crucial na compreensão dessa dinâmica. Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia de processamento de imagens e o aumento da disponibilidade de dados de satélites, tornou-se possível monitorar a expansão urbana com maior precisão. Nesta seção, aborda-se os principais trabalhos que utilizam o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDBI (Normalized Difference Built-up Index) para esse fim, destacando suas contribuições e limitações.

2.1 Sensoriamento Remoto na Análise da Expansão Urbana

O uso de imagens de satélite tem revolucionado a forma como a expansão urbana é monitorada e analisada. Segundo Luz et al. (2019), a utilização do NDVI e do NDBI para avaliar o crescimento urbano em municípios como Rio das Ostras - RJ demonstrou a eficácia desses índices na distinção entre áreas vegetadas e urbanizadas. O NDVI é amplamente utilizado para medir a densidade da vegetação, enquanto o NDBI se concentra em identificar construções e infraestrutura urbana.

A combinação desses índices tem sido uma abordagem eficaz para mapear a ocupação do solo em cidades de médio e grande porte. Estudos como o de Wang et al. (2021) mostram que a utilização conjunta do NDVI e NDBI permite monitorar a urbanização e identificar áreas de transição entre vegetação e construções com precisão. Além disso, Alzahrani et al. (2022) verificaram que esses índices são fundamentais para monitoramento e planejamento urbano, especialmente em contextos onde a expansão das áreas construídas ameaça os

espaços verdes. Da mesma forma, Singh et al. (2020) comprovaram que o uso combinado dos índices contribui significativamente para a análise detalhada das transformações no uso do solo, proporcionando uma visão integrada da paisagem urbana.

Kaya e Dervişoğlu (2020) analisaram o crescimento urbano de Istambul, uma das cidades de crescimento mais rápido no mundo, utilizando o NDBI e o NDVI. O estudo revelou que esses índices são altamente eficazes na detecção de mudanças no uso do solo ao longo do tempo, proporcionando uma visão clara da expansão descontrolada. Por meio do uso do Google Earth Engine (GEE), a pesquisa foi capaz de automatizar o processamento de grandes volumes de dados, o que facilitou a obtenção de resultados mais precisos e em menor tempo.

2.2 Google Earth Engine como Ferramenta para Estudos Urbanos

O Google Earth Engine tem se mostrado uma plataforma essencial para o processamento de imagens de satélite em larga escala. Sua capacidade de processar e armazenar grandes volumes de dados, combinada com a disponibilidade de imagens históricas, torna-o ideal para estudos de mudanças no uso do solo. Oliveira et al. (2021) utilizaram o GEE para analisar as mudanças no uso e ocupação do solo no município de Eunápolis-BA, utilizando os índices NDVI e NDBI. O estudo destacou que, ao longo de um período de 20 anos, houve uma significativa perda de áreas vegetadas, substituídas por áreas urbanizadas e agrícolas. O uso do GEE permitiu que essa análise fosse conduzida de forma rápida e precisa, oferecendo uma visão clara das transformações espaciais.

Outro estudo relevante é o de Hu et al. (2020), que utilizaram o GEE para monitorar as mudanças no uso do solo em Beijing. O estudo revelou que o crescimento urbano resultou na diminuição das áreas vegetadas, exacerbando os problemas ambientais, como a poluição do ar e a escassez de água. O NDVI foi crucial para identificar essas mudanças, enquanto o NDBI permitiu mapear as áreas urbanizadas com precisão. A capacidade do GEE de integrar múltiplas fontes de dados e processá-los rapidamente foi um dos fatores-chave que permitiram uma análise detalhada e robusta do crescimento urbano na cidade.

2.3 Impactos Ambientais da Expansão Urbana

A expansão urbana, quando não controlada, pode gerar graves impactos ambientais. Silva (2022) analisou como a conversão de áreas naturais em áreas urbanas e agrícolas no bioma Cerrado afetou os padrões de evapotranspiração. Segundo o autor, o desmatamento e

a urbanização intensificam as mudanças climáticas locais, resultando em um aumento nas temperaturas e na diminuição da umidade. A aplicação do NDVI permitiu mapear com precisão as áreas afetadas pela perda de cobertura vegetal, enquanto o NDBI afeta as novas áreas urbanizadas. O estudo destaca a importância de se integrar análises ambientais no planejamento urbano, a fim de mitigar os impactos negativos do crescimento urbano desenhado.

Além dos impactos climáticos, a expansão urbana também altera o ciclo hidrológico e os ecossistemas locais. Luz et al. (2019) destacam que a urbanização pode resultar no aumento da impermeabilização do solo, o que afeta a infiltração da água e contribui para enchentes e deslizamentos de terra. O estudo conduzido no Rio das Ostras revelou que áreas anteriormente cobertas por vegetação foram substituídas por infraestruturas urbanas, exacerbando os riscos ambientais.

A literatura revisada demonstra a relevância do uso de técnicas de sensoriamento remoto, como o NDVI e o NDBI, para o estudo da expansão urbana. Esses índices, aliados a plataformas poderosas como o Google Earth Engine, têm fornecido uma visão detalhada e precisa das mudanças no uso do solo em cidades de diferentes escalas. O crescimento urbano, embora necessário para o desenvolvimento econômico, precisa ser monitorado e planejado de forma sustentável, a fim de mitigar seus impactos ambientais e sociais.

Os estudos mencionados apontam a necessidade de um planejamento urbano que considere os efeitos da urbanização sobre os recursos naturais e o meio ambiente. A aplicação dessas metodologias em cidades como Três Lagoas permitirá não apenas mapear o crescimento urbano, mas também fornecer subsídios para políticas públicas voltadas para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O município de Três Lagoas, localizado no estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1), é reconhecido por sua relevância econômica e estratégica, especialmente no setor de celulose e papel, sendo um dos maiores polos industriais dessa cadeia produtiva no Brasil. Além de sua importância econômica, o município se destaca pela abundância de recursos hídricos, que favorece tanto a atividade industrial quanto o uso sustentável desses recursos. A proximidade com os rios Paraná e Sucuriú, por exemplo, torna Três Lagoas um ponto estratégico para a irrigação agrícola e o abastecimento de água para consumo e indústria. Esse contexto hídrico contribui para a biodiversidade local, o que aumenta a importância da gestão ambiental integrada, considerando tanto os impactos da urbanização quanto a preservação dos recursos naturais (Mesquita, 2014). A cidade está situada na região leste do estado, fazendo divisa com o estado de São Paulo, e é banhada pelo rio Paraná, o que potencializa sua posição como um eixo logístico e industrial. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), Três Lagoas possui uma população estimada de 126.728 habitantes, com grande importância no cenário regional e nacional.

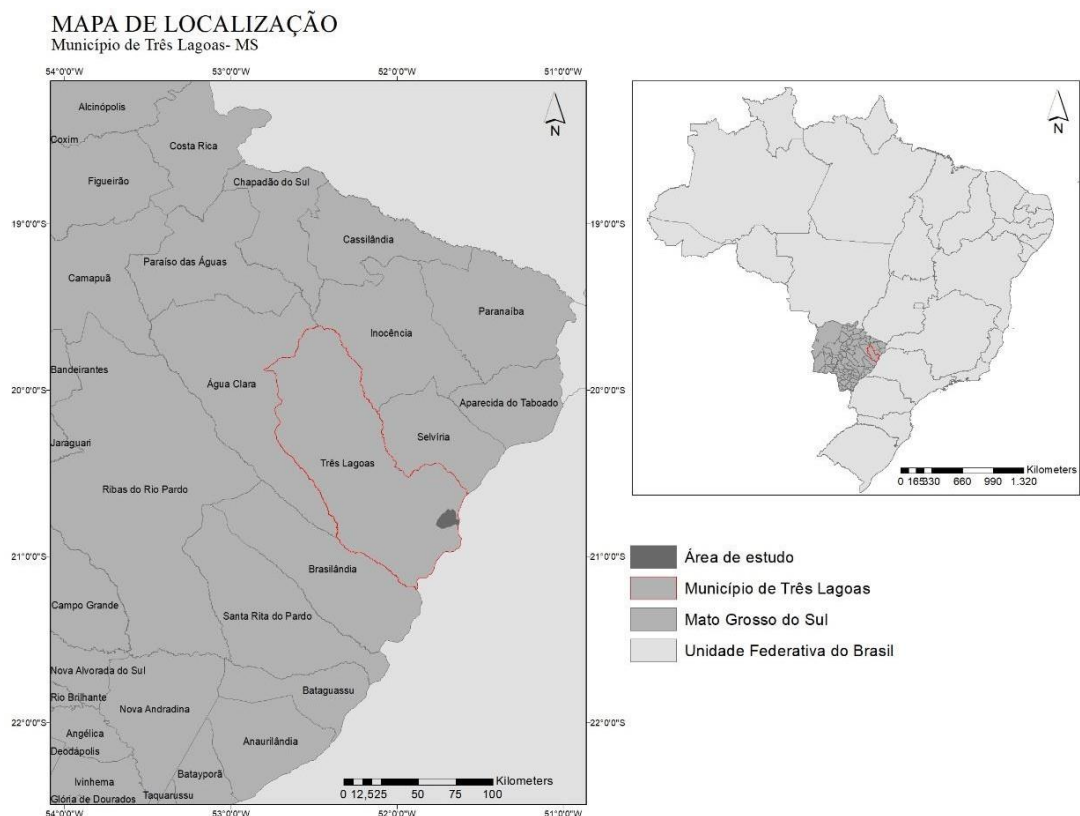


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo

A localização estratégica de Três Lagoas tem favorecido o desenvolvimento urbano e industrial, gerando um crescimento significativo da malha urbana nos últimos anos. Esse processo de expansão, no entanto, traz consigo desafios relacionados ao uso e ocupação do solo, à preservação ambiental e à gestão de recursos hídricos (Seto et al., 2011).

A economia de Três Lagoas é fortemente impulsionada pelas indústrias de celulose, papel e energia, o que atrai investimentos e migrantes de outras regiões. Esse fluxo contribui diretamente para a expansão da cidade, transformando áreas que antes eram de vegetação nativa ou destinadas à agricultura em zonas urbanizadas. Segundo estudos recentes, como o de Mendonça (2020), o crescimento urbano de Três Lagoas ganhou impulso no final da década de 2000, com a instalação de grandes empresas de celulose, como a Fibria e a Eldorado Brasil. Esse movimento industrial resultou em uma significativa demanda por infraestrutura, habitação e serviços, que, por sua vez, aceleraram o processo de expansão urbana na cidade.

O clima de Três Lagoas é tropical, caracterizado por uma estação seca pronunciada e uma estação chuvosa, fatores que influenciam a vegetação da região, predominantemente composta por cerrado e áreas de pastagem. Com o crescimento acelerado da cidade, especialmente após o final da década de 2000, a urbanização tem causado uma substituição da vegetação nativa, com a expansão das áreas urbanas para atender à demanda gerada pelo aumento populacional e pelo desenvolvimento industrial. A instalação de grandes indústrias, como as de celulose, contribuiu para a expansão das áreas urbanas e a transformação do uso do solo, o que destaca a importância de estudos que monitoram essas mudanças e buscam equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental (Silva, 2021).

3.2 Ferramentas Utilizadas

A análise dos dados foi realizada predominantemente no Google Earth Engine, que oferece um ambiente de computação baseado em nuvem, permitindo o processamento eficiente de grandes volumes de dados geoespaciais. Além disso, foram utilizadas ferramentas complementares, como o software QGIS, para a visualização e manipulação dos resultados e para a criação de mapas temáticos detalhados.

3.3 Procedimento metodológico

Para a execução deste estudo, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto e análise espacial, com o objetivo de avaliar a expansão da malha urbana de Três Lagoas, por

meio da aplicação dos índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), ambos calculados a partir de imagens Landsat processadas na plataforma Google Earth Engine (GEE).

3.4 Delimitação da Área de Estudo

A área de estudo corresponde ao município de Três Lagoas, cujos limites geopolíticos foram obtidos a partir da base de dados oficial do IBGE (2022). Essa delimitação foi estabelecida para concentrar a análise nas áreas urbanas e nas zonas adjacentes diretamente impactadas pelo processo de expansão urbana.

Para a análise, foram utilizadas imagens da série Landsat, com resolução espacial de 30 metros, que se mostraram adequadas para estudos em escala municipal. A escolha dessa resolução permitiu capturar detalhes suficientes para compreender as dinâmicas de ocupação e uso do solo, especialmente em áreas de médio porte, como Três Lagoas (OLIVEIRA et al., 2021). Essa abordagem possibilitou uma visão abrangente da interação entre as zonas urbanas e seus arredores, contribuindo para uma análise detalhada das transformações espaciais ocorridas no município.

3.5 Coleta e Processamento de Dados

Os dados foram obtidos a partir das imagens de satélite da série Landsat, via GEE. Foram selecionadas imagens dos sensores Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+), e Landsat 8 (OLI), abrangendo o período de 2000 a 2023. A escolha desse intervalo temporal visou capturar as principais fases de expansão urbana de Três Lagoas, especialmente após a instalação de grandes indústrias na região, como apontado por Mendonça (2020). As imagens foram processadas diretamente no Google Earth Engine, uma plataforma robusta que permite o processamento em larga escala de dados geoespaciais, facilitando o manuseio de grandes volumes de dados e a aplicação de índices espectrais.

As imagens utilizadas passaram por correção atmosférica utilizando o algoritmo Landsat Surface Reflectance, disponível na biblioteca de processamento do GEE. Essa etapa é essencial para remover os efeitos de aerossóis e vapor d'água, que podem distorcer as leituras espectrais (Huang et al., 2020).

Posteriormente, foram gerados os índices NDVI e NDBI para cada imagem, a fim de quantificar a cobertura vegetal e a área urbanizada, respectivamente.

O NDVI, desenvolvido por Rouse et al. (1974), é um dos índices mais utilizados para

medir a densidade de vegetação, sendo calculado pela diferença entre as bandas de infravermelho próximo (NIR) e vermelho (RED), dividida pela soma das mesmas. Já o NDBI, proposto por Zha, Gao e Ni (2003), é usado para destacar áreas urbanas e é calculado pela diferença entre as bandas de infravermelho curto (SWIR) e NIR, dividida pela soma das mesmas.

3.6 Aplicação dos Índices NDVI e NDBI

Os valores de NDVI e NDBI foram extraídos para cada pixel da área de estudo e agrupados para gerar mapas temáticos da distribuição de vegetação e áreas urbanizadas ao longo do tempo. Essas informações foram analisadas em conjunto para identificar as tendências de expansão da malha urbana e a redução das áreas vegetadas no município. Em um estudo realizado por Koko et al. (2021), foi destacado como as mudanças no uso e cobertura da terra impactam diretamente a formação de ilhas de calor urbano e como a combinação desses índices oferece uma visão detalhada das transformações urbanas, permitindo uma análise integrada entre o crescimento urbano e as áreas naturais., utilizando índices como o NDVI e o NDBI para análise. Esses indicadores permitiram uma visão abrangente das transformações espaciais na metrópole de Abuja, na Nigéria, ao longo de 29 anos, evidenciando a substituição de áreas vegetadas por superfícies urbanizadas. A integração desses índices oferece uma abordagem eficaz para correlacionar o crescimento urbano acelerado com a manipulação de áreas naturais, contribuindo para um planejamento urbano mais sustentável e baseado em dados concretos.

3.7 Análise Temporal e Classificação

Após o cálculo dos índices, foi aplicada uma classificação supervisionada, utilizando o algoritmo de Random Forest, para separar as classes de uso do solo. O uso desse algoritmo é justificado pela sua alta precisão em separar áreas vegetadas de áreas urbanizadas, conforme demonstrado por Galvão et al. (2023). As classes incluíram: vegetação densa, vegetação esparsa, solo exposto, área urbana e corpos d'água.

Os dados obtidos foram posteriormente integrados em um banco de dados geoespacial, permitindo a análise temporal das mudanças no uso do solo. As tendências de expansão urbana foram avaliadas com base na variação dos valores de NDBI ao longo dos anos, comparando as áreas urbanizadas com as áreas de vegetação mapeadas pelo NDVI.

3.8 Análise de Correlação

A relação entre a cobertura vegetal e a expansão urbana em Três Lagoas foi investigada por meio da aplicação da Correlação de Pearson e do Coeficiente de Determinação (R^2). A Correlação de Pearson

(r) é amplamente utilizada para medir o grau de associação linear entre duas variáveis, assumindo valores entre -1 e +1. Valores próximos de +1 indicam uma forte correlação positiva, enquanto valores próximos de -1 sugerem uma forte correlação negativa. Por outro lado, o Coeficiente de Determinação (R^2) quantifica a proporção da variância da variável dependente explicada pela variável independente, sendo uma métrica útil para avaliar a qualidade do ajuste linear (Moore, McCabe e Craig, 2021).

Neste estudo, os índices NDVI e NDBI foram calculados a partir de imagens dos sensores Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) e Landsat 8 (OLI), utilizando cenas adquiridas nos anos de 1990, 2010 e 2020. Para cada década, foram selecionadas imagens representativas da estação seca, preferencialmente no período entre junho e agosto, garantindo condições ideais de visibilidade, com baixa interferência de nuvens, de acordo com os critérios de qualidade disponíveis na plataforma de aquisição dos dados. Os valores médios anuais de cada índice foram extraídos da área de estudo, delimitada pelo perímetro urbano de Três Lagoas, e processados no Google Earth Engine. A partir desses dados, foram aplicados os cálculos de r e R^2 para cada década, permitindo uma análise detalhada da relação entre a expansão urbana e a perda de vegetação.

Os gráficos de dispersão foram gerados para cada período, mostrando a distribuição dos valores de NDVI e NDBI, bem como as linhas de tendência linear associadas. O coeficiente de Pearson foi utilizado para medir a força e direção da relação linear, enquanto o R^2 foi calculado para avaliar o grau em que o NDBI pode ser explicado pela variação no NDVI.

A abordagem adotada permitiu quantificar a relação inversa entre os índices e interpretar os impactos das mudanças urbanas em diferentes períodos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os mapas de NDVI para as décadas de 1990, 2010 e 2020. Observa-se uma clara redução na cobertura vegetal no município de Três Lagoas ao longo do período analisado. Em 1990, predominam áreas com altos valores de NDVI, especialmente nas extremidades do território, indicando uma maior densidade de vegetação e uma menor intensidade de ocupação urbana. No entanto, em 2010, nota-se uma diminuição dessas áreas verdes, com o surgimento de valores mais baixos no núcleo urbanocentral, indicando uma expansão urbana ou conversão de áreas vegetadas para outros usos. Em 2020, essa tendência se intensifica, com valores de NDVI mais baixos predominando em boa parte do município, confirmando a redução progressiva da vegetação em decorrência do avanço da ocupação urbana.

ANÁLISE TEMPORAL DO NDVI EM TRÊS LAGOAS-MS

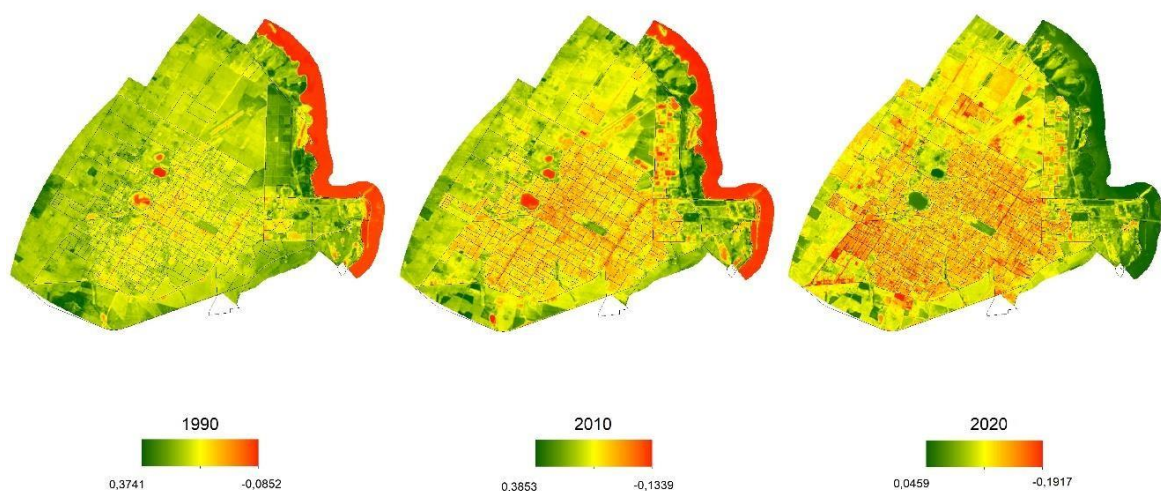


Figura 2– Análise temporal do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para as décadas de 1990, 2010 e 2020.

Serão apresentados, a seguir os índices NDVI (Figuras 3, 4 e 5), destacando sua distribuição espacial dentro dos limites dos bairros de Três Lagoas. Essa análise considera os setores censitários como base para delimitar os bairros, permitindo identificar a relação entre os valores dos índices espectrais e a organização espacial das áreas urbanas, com o objetivo de compreender as dinâmicas de expansão e ocupação do solo urbano.

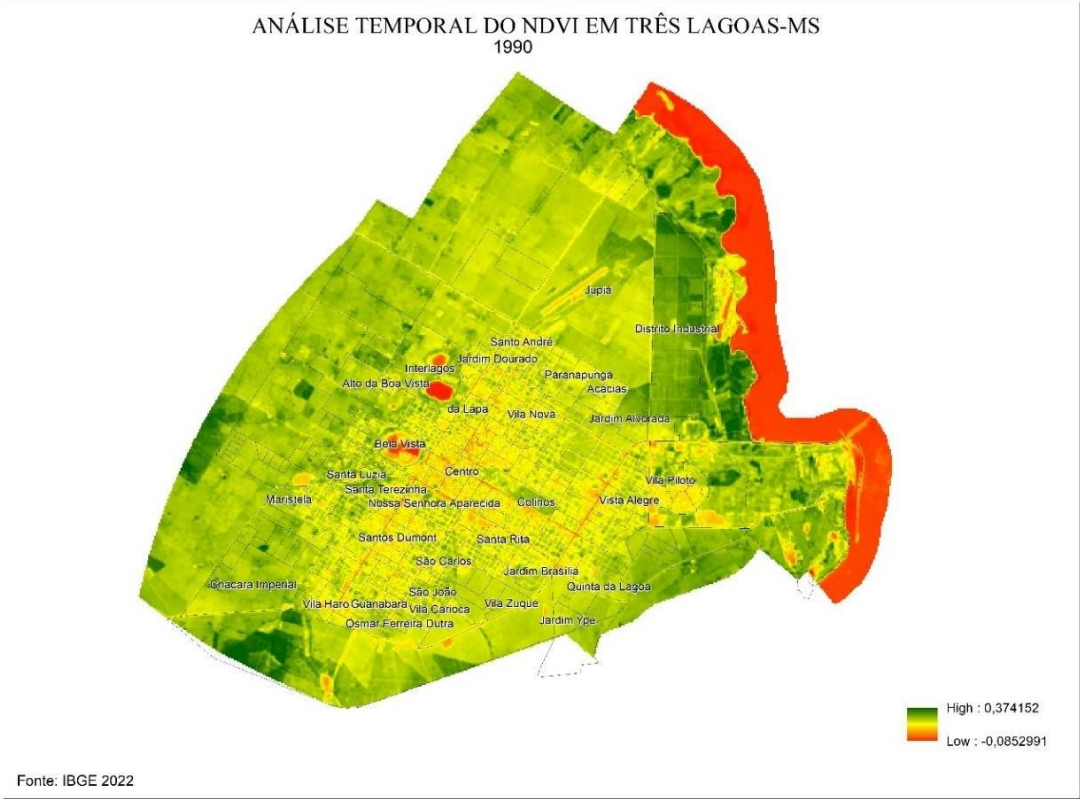


Figura 4- Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 1990

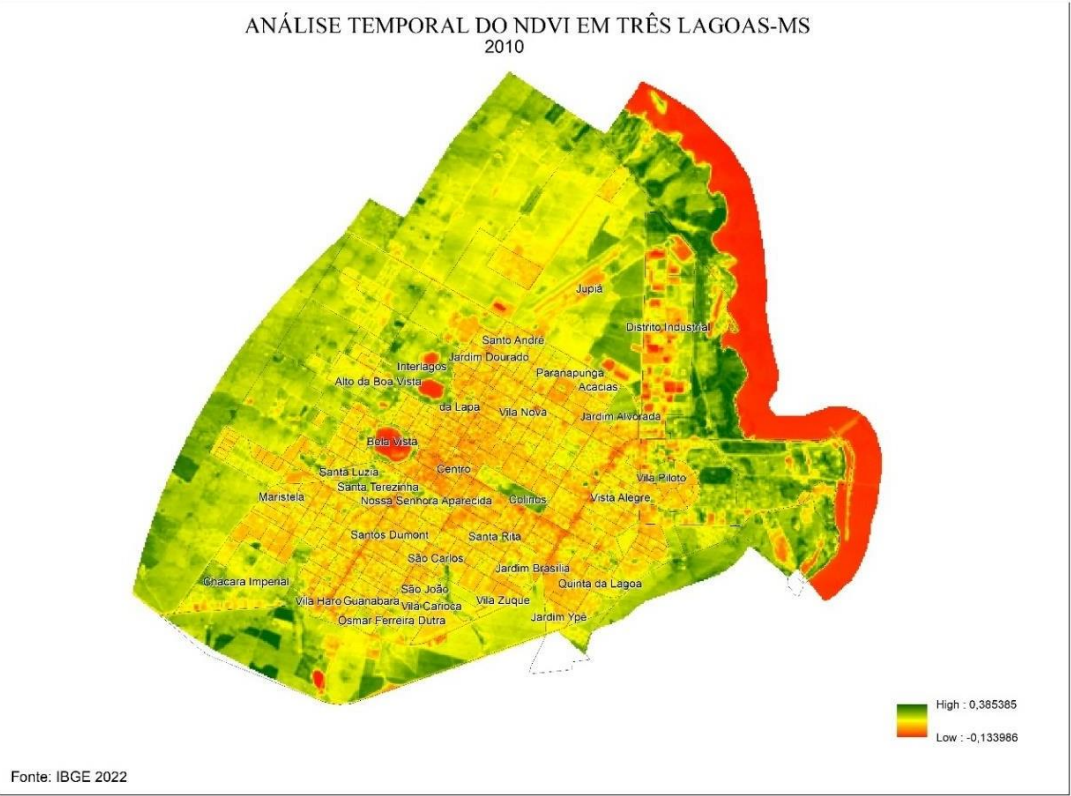


Figura 3– Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2010.

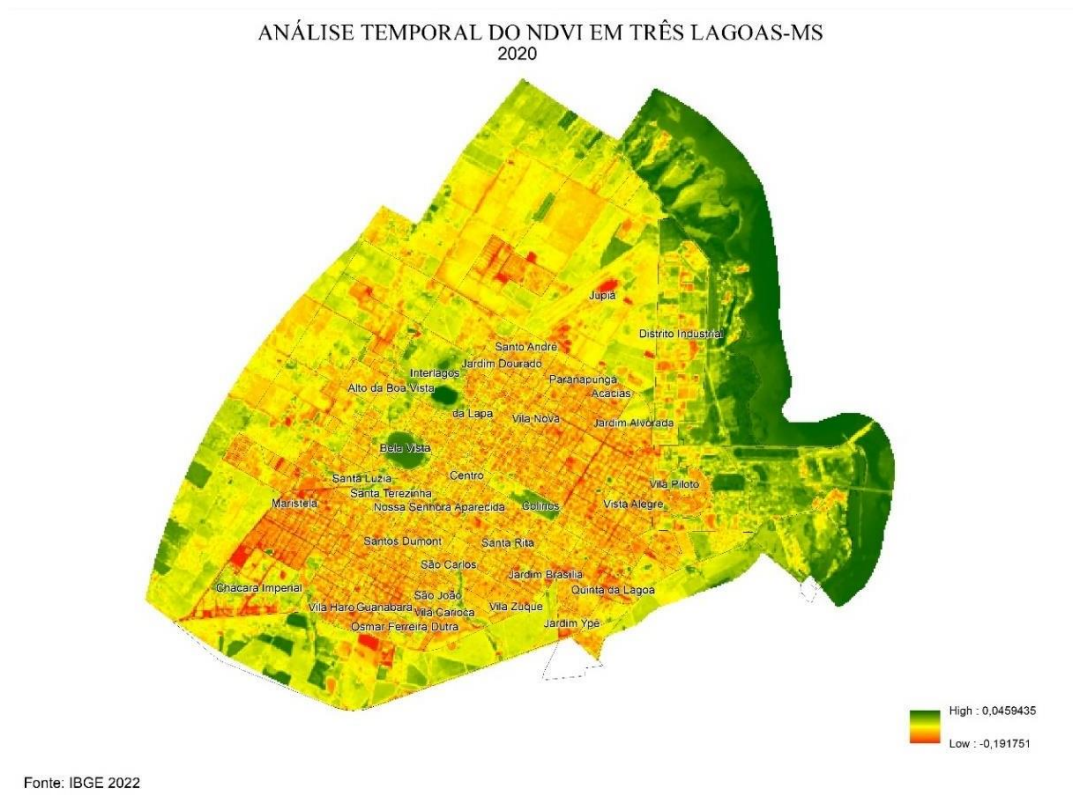


Figura 5– Análise temporal expandida do NDVI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2020.

A Figura 6, que ilustra os mapas de NDBI para os mesmos períodos, evidencia um aumento significativo nas áreas urbanizadas ao longo do tempo. Em 1990, as superfícies construídas estão concentradas principalmente no núcleo central do município, enquanto as áreas periféricas apresentam valores predominantemente negativos, associados a vegetação ou áreas naturais. Em 2010, há uma expansão visível das áreas urbanizadas em direção às periferias, indicando o crescimento do perímetro urbano e a intensificação do uso do solo para infraestrutura urbana. Em 2020, essa expansão é ainda mais evidente, com uma maior proporção do território apresentando valores positivos de NDBI, o que reflete um aumento das superfícies construídas e urbanizadas.

ANÁLISE TEMPORAL DO NDBI EM TRÊS LAGOAS-MS

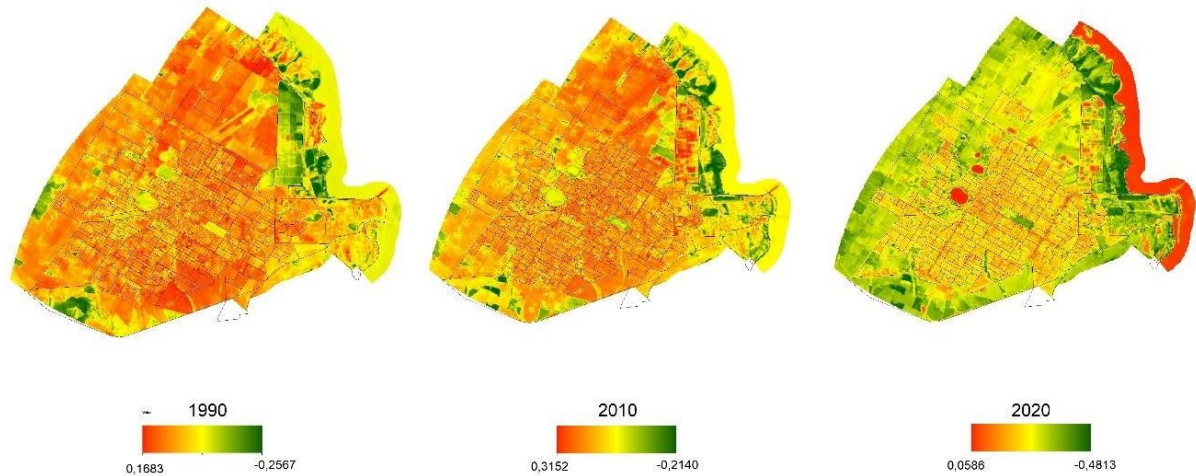


Figura 6– Análise temporal do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para as décadas de 1990, 2010 e 2020.

Serão apresentados, a seguir os índices NDBI (Figuras 7, 8 e 9), destacando sua distribuição espacial dentro dos limites dos bairros de Três Lagoas. Essa análise considera os setores censitários como base para delimitar os bairros, permitindo identificar a relação entre os valores dos índices espectrais e a organização espacial das áreas urbanas, com o objetivo de compreender as dinâmicas de expansão e ocupação do solo urbano.

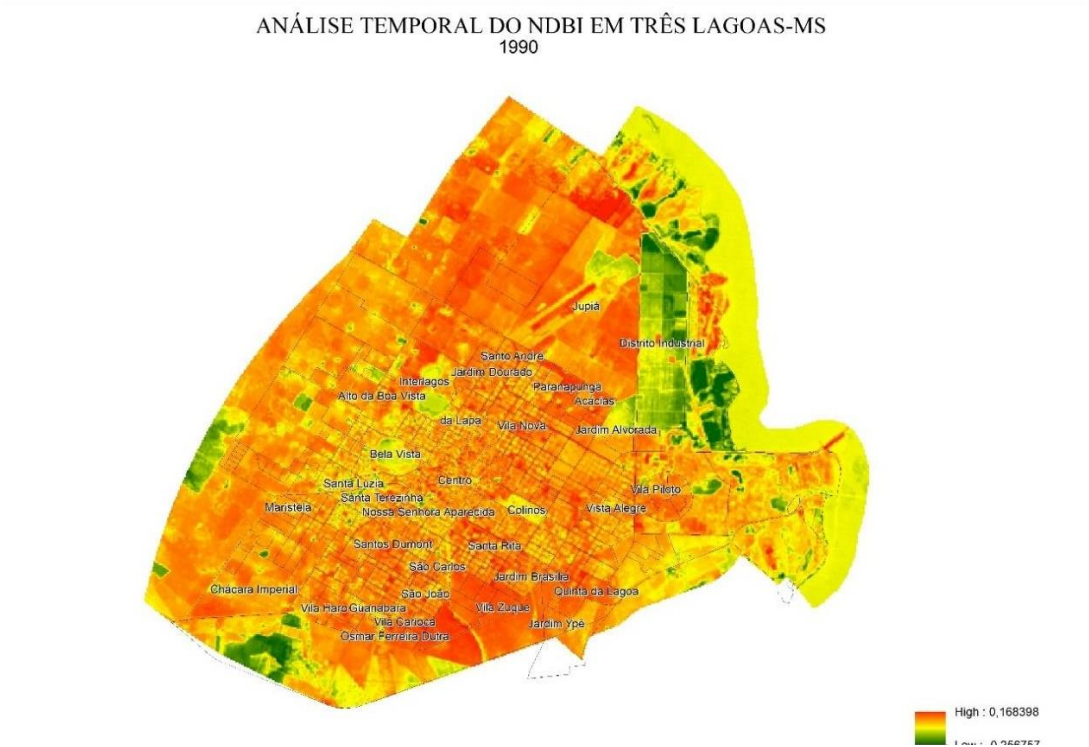


Figura 7– Análise temporal expandida do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 1990.

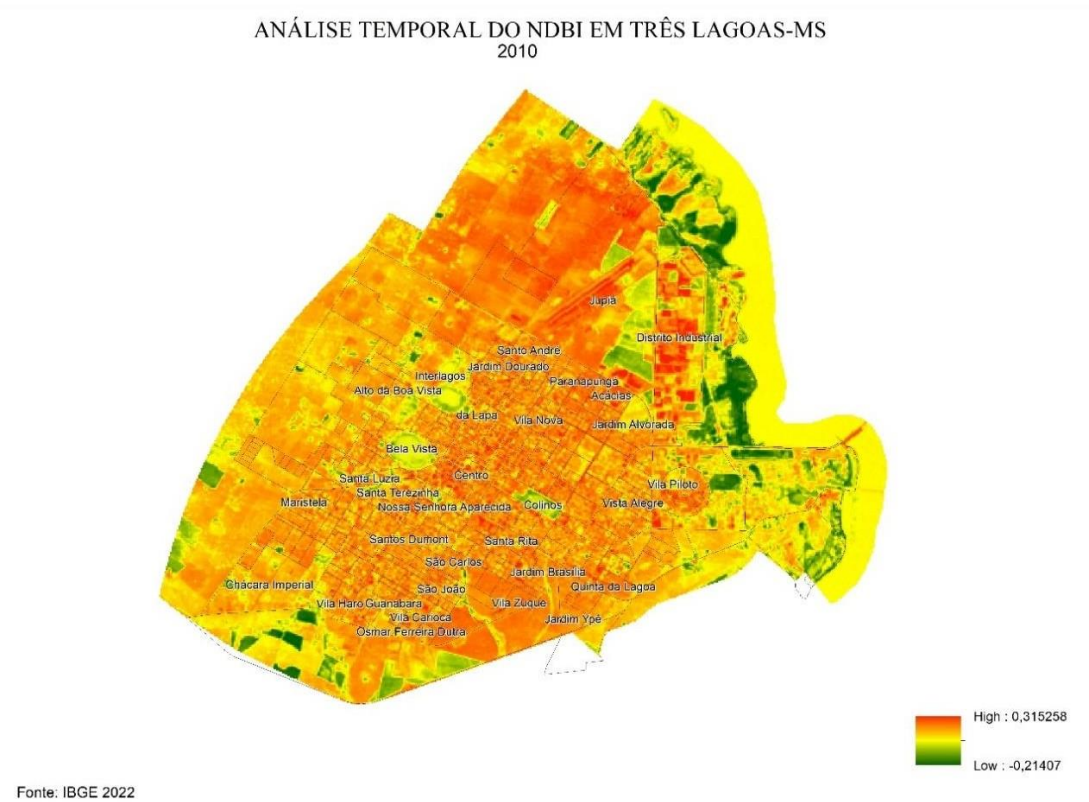


Figura 8– Análise temporal expandida do NDBI médio no município de Três Lagoas, MS, para a década de 2010.

As diferenças observadas nos valores do NDBI ao longo das décadas podem ser parcialmente explicadas pelas características técnicas distintas dos sensores utilizados nas análises; Thematic Mapper(TM) do Landsat 5, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) do Landsat 7 e Operational Land Imager(OLI) do Landsat 8. Esses sensores apresentam calibrações radiométricas, resoluções espectrais e sensibilidades diferentes, especialmente nas bandas NIR e SWIR, utilizadas para o cálculo do NDBI. Roy et al. (2014) destacam que o OLI, em comparação aos sensores TM e ETM+, possui maior precisão radiométrica e melhor separação espectral, o que pode influenciar os valores dos índices espectrais, mesmo sob condições ambientais similares. Além disso, Li, Jiang e Feng (2013) apontam que a comparação entre sensores Landsat frequentemente evidencia discrepâncias nos índices devido a diferenças na resposta espectral e nos métodos de correção atmosférica. Esses fatores podem impactar superfícies específicas, como corpos d'água, que apresentam variações espectrais mais sensíveis às características do sensor e às condições de aquisição das imagens. Assim, as discrepâncias no NDBI observadas ao longo do período analisado podem ser influenciadas tanto pelas mudanças reais no uso e cobertura do solo quanto pelas particularidades técnicas dos sensores TM, ETM+ e OLI.

A análise dos índices NDVI e NDBI ao longo das décadas de 1990, 2010 e 2020 revelou um padrão consistente de expansão urbana em Três Lagoas, marcado pela substituição gradual de áreas vegetadas por construções e infraestrutura urbana. Tal padrão reflete as transformações no uso e coberturado solo, evidenciando os impactos do crescimento urbano sobre o meio ambiente ao longo do período analisado. A redução nos valores de NDVI aponta para a diminuição das áreas vegetadas, enquanto o aumento dos valores de NDBI está associado à ampliação das áreas construídas. Os mapas temáticos de diferentes anos demonstraram que essa expansão ocorre, predominantemente, nas periferias e em regiões industriais. Esses resultados corroboram estudos como os de Seto et al. (2012), que destaca o papel das atividades industriais e da urbanização como fatores impulsionadores do desenvolvimento urbano acelerado, especialmente em regiões em expansão econômica. Tais dinâmicas foram observadas em diversos contextos globais, reforçando a importância de analisar o impacto das indústrias no crescimento desordenado das cidades.

4.1 Correlação de Pearson e Coeficiente de Determinação entre NDVI e NDBI

A análise da relação entre NDVI e NDBI, realizada por meio da Correlação de Pearson (r) e do Coeficiente de Determinação (R^2), revelou padrões consistentes de urbanização e perda de cobertura vegetal ao longo das três décadas estudadas. Os resultados são apresentados e discutidos nas Figuras 10, 11 e 12, que ilustram os gráficos de dispersão e as respectivas linhas de tendência para cada período.

A Figura 10 apresenta o gráfico de dispersão para a década de 1990, com $r = -0,736$ e $R^2 = 0,525$. Esses resultados indicam uma manifestação negativa forte, com aproximadamente 52,5% da variância do NDBI sendo explicada pela variação no NDVI. Durante esse período, observa-se que a relação inversa entre os índices já foi significativa, indicando que a expansão urbana estava começando a impactar níveis de cobertura vegetal, na medida em que áreas verdes eram progressivamente concedidas por superfícies construídas. Este padrão é consistente com as tendências globais de urbanização, nas quais o crescimento urbano geralmente é acompanhado pela conversão de espaços naturais em áreas construídas, como estradas, edifícios e outras infraestruturas (SETO et al., 2012).

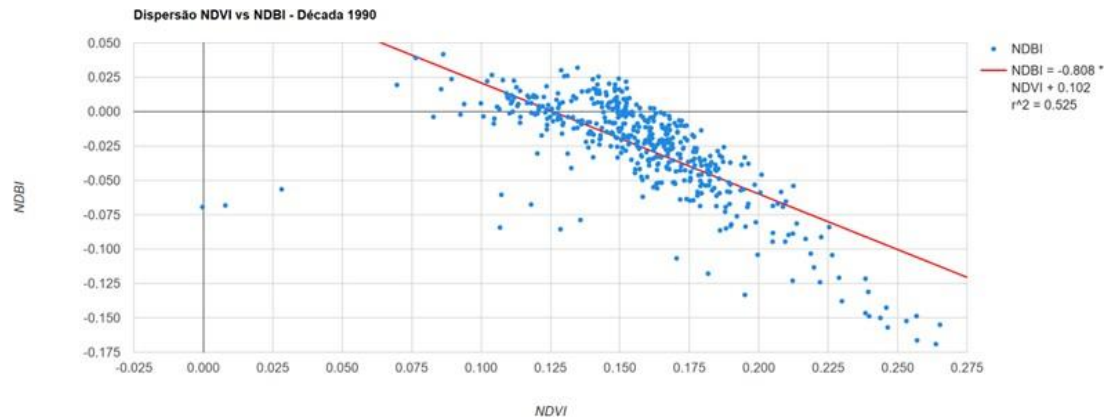


Figura 10– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 1990.

Em particular, o aumento da área construída resulta na diminuição da vegetação, o que é refletido na diminuição do índice NDVI. A relação inversa observada entre o NDVI e o NDBI também é um indicativo claro do impacto ambiental negativo do crescimento urbano, uma vez que os índices de vegetação (NDVI) e as áreas construídas (NDBI) tendem a se mover em alternativas opostas em contextos de urbanização acelerada.

A Figura 11 apresenta os dados da década de 2010, evidenciando um aumento na força da correlação negativa, com $r = -0,826$ e $R^2 = 0,683$. Isso significa que 68,3% da variância do NDBI podem ser explicados pela variação no NDVI, tornando este o período com a relação mais forte entre os índices.

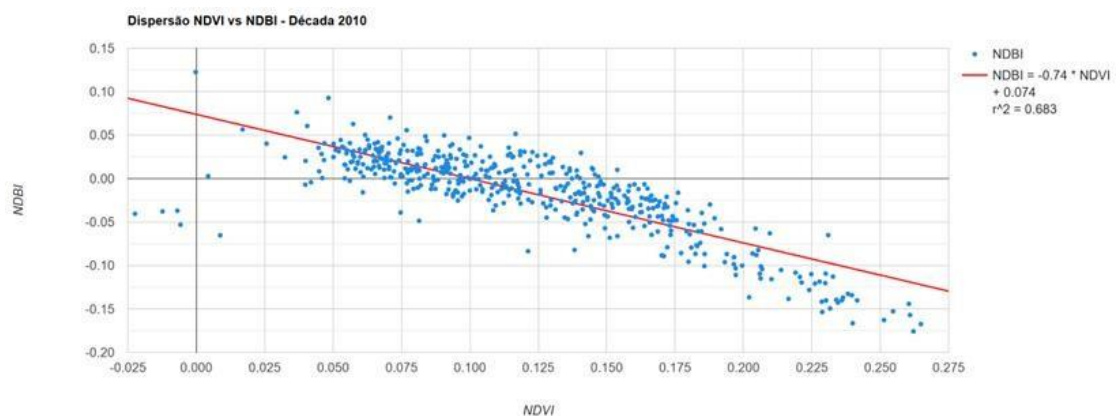


Figura 11– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 2010.

Este resultado reflete um período de intensa expansão urbana, impulsionado pelo crescimento industrial da região. Conforme destacado por Silva (2022), o período entre 2000 e 2020 foi marcado pela instalação de grandes empreendimentos industriais, o que resultou em uma conversão acelerada de áreas naturais para infraestrutura urbana. A linha de

tendência na Figura 11 reforça a consistência dessa relação, mostrando um declínio acentuado no NDVI conforme o NDBI aumenta..

De acordo com o IBGE (2024), a praça central de Três Lagoas, conhecida historicamente como Praça da Bandeira e atualmente denominada Praça Ramez Tebet, passou por uma profunda reestruturação na década de 2000. Essa intervenção envolveu a remoção de diversas árvores, resultando em uma redução significativa do NDVI médio e um aumento do NDBI no período.

Na Figura 12, os resultados para a década de 2020 mostram uma leve redução na força da correlação negativa em comparação à década anterior, com $r = -0,758$ e $R^2 = 0,562$. Apesar disso, a relação permanece significativa, indicando que 56,2% da variância do NDBI ainda podem ser explicados pela variação no NDVI.

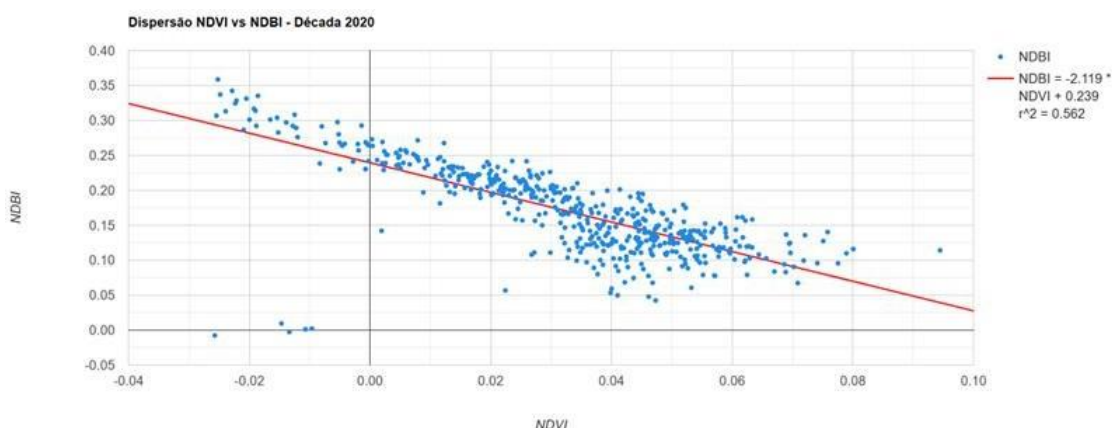


Figura 12– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 1990.– Dispersão NDVI vs NDBI para a década de 2020..

Este comportamento pode sinalizar uma estabilização no ritmo de expansão urbana em algumas áreas, possivelmente devido a políticas públicas ou iniciativas de planejamento sustentável implementadas nos últimos anos. No entanto, a persistência de valores negativos de correlação demonstra que o processo de urbanização continua a impactar negativamente a vegetação, embora em um ritmo potencialmente mais controlado.

As três décadas analisadas revelam um padrão consistente de correlação negativa entre NDVI e NDBI, indicando que o crescimento urbano está associado à redução da cobertura vegetal. Os gráficos de dispersão (Figuras 10, 11 e 12) corroboram essa relação, com os valores de R^2 mostrando que a variância do NDBI é explicada de forma significativa pela variação no NDVI.

O período de 2010 se destaca como o de maior impacto, sugerindo que o crescimento industrial foi o principal motor da expansão urbana e da consequente perda de vegetação.

Estes resultados estão de acordo com os achados de Huang et al. (2020), que documentaram tendências semelhantes em estudos de urbanização em outras regiões industrializadas.

Apesar da leve estabilização observada em 2020, os valores negativos de r e elevados de R^2 sugerem que as políticas atuais ainda não são suficientes para reverter o impacto da urbanização sobre a vegetação. Esses resultados reforçam a necessidade de ações mais efetivas no planejamento urbano sustentável, a fim de mitigar a perda de áreas vegetadas e promover um equilíbrio entre desenvolvimento urbano e conservação ambiental

4.2 Comparação Temporal e Impactos na Dinâmica Ambiental

As Figuras 13 e 14 destacam a evolução dos índices NDVI e NDBI, respectivamente, ao longo das décadas de 1990, 2010 e 2020, revelando padrões de mudanças ambientais e urbanas em Três Lagoas, MS. Na Figura 13, observa-se uma queda acentuada nos valores médios do NDVI, indicando a redução progressiva da cobertura vegetal ao longo das décadas. Esse declínio é particularmente marcante após 2010, coincidindo com a intensificação das atividades industriais e a expansão urbana na região, especialmente devido à instalação de grandes indústrias de celulose. Esse processo reflete a conversão de áreas naturais para usos urbanos, um padrão amplamente identificado por Oliveira et al. (2021) em contextos similares de municípios com forte atividade industrial.

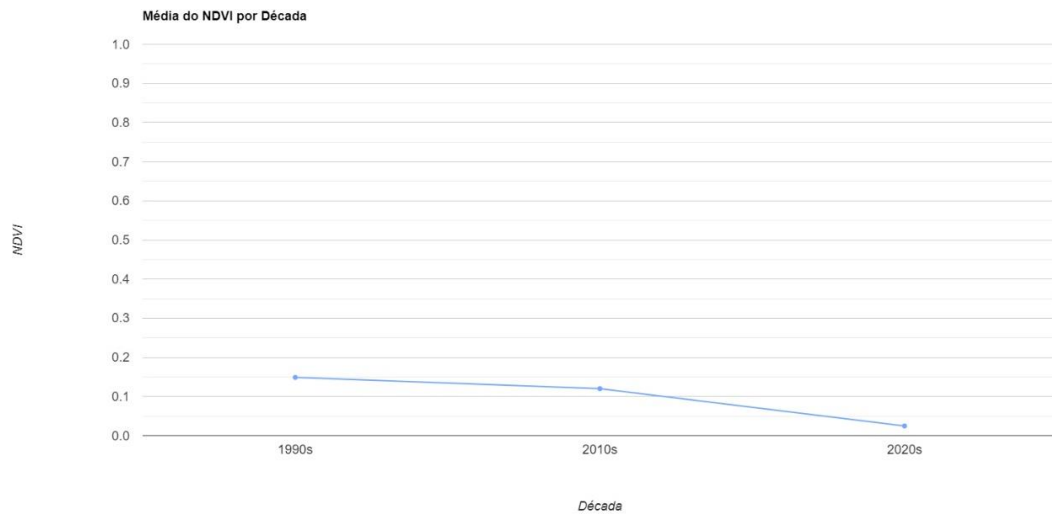


Figura 13– Variação temporal da média do NDVI por década em Três Lagoas, MS, destacando a redução da cobertura vegetal entre as décadas de 1990, 2010 e 2020.

Na Figura 14, os valores médios do NDBI apresentam um aumento gradual ao longo do período analisado, sugerindo uma intensificação das áreas construídas.



Figura 14- Variação temporal da média do NDBI por década em Três Lagoas, MS, indicando o aumento das áreas construídas e impermeabilizadas entre as décadas de 1990, 2010 e 2020.

A partir de 2010, esse crescimento torna-se mais evidente, reforçando a relação entre a urbanização acelerada e a substituição de áreas vegetadas por infraestrutura urbana. Esses resultados corroboram as discussões de Medeiros et al. (2021), que destacam como a impermeabilização do solo, consequência da expansão urbana, afeta o microclima local e o

ciclo hidrológico. A diminuição da infiltração de água em áreas impermeabilizadas pode agravar problemas como enchentes e alterações na disponibilidade hídrica. Esse cenário reforça a importância de monitorar as mudanças no uso do solo e de implementar estratégias de planejamento urbano sustentável para mitigar os impactos ambientais.

4.3 Análise Detalhada das Direções da Expansão Urbana de Três Lagoas

A análise das imagens de satélite e dos índices NDBI entre os anos de 2000, 2010 e 2020 revelou dinâmicas de expansão urbana que variam em intensidade e direção (Figuras 15, 16 e 17). Os dados demonstraram um padrão de crescimento mais acentuado em determinadas direções, como norte e leste, enquanto o sul e o oeste apresentaram um desenvolvimento mais contido, muitas vezes associado a características geográficas ou restrições ambientais.



Figura 15- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 1990, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 2010 e 2020.



Figura 16- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 2010, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 1990 e 2020.



Figura 17- Imagem de satélite de Três Lagoas-MS em 2020, destacando a expansão urbana de determinada área para comparação com os anos de 1990 e 2010.

4.3.1 Crescimento em Direção ao norte

A expansão no sentido norte está diretamente ligada ao desenvolvimento industrial da cidade, particularmente pela instalação de grandes indústrias de celulose e papel que impulsionaram a urbanização dessa área. A partir de 2010, houve uma intensificação do crescimento residencial e comercial próximo às zonas industriais, evidenciada pelo aumento dos valores de NDBI, que identificam construções. Além disso, a instalação de empreendimentos de grande porte, como o Shopping Três Lagoas e o Hospital Regional, reforçou a atração populacional e o desenvolvimento de infraestrutura no entorno, diversificando os serviços e ampliando a oferta comercial e de saúde na região.

Essa expansão foi favorecida também pela presença de vias estratégicas que conectam Três Lagoas a outras cidades, fortalecendo sua posição como um eixo logístico regional. O norte da cidade consolidou-se como uma área prioritária para o planejamento urbano, especialmente para atender à crescente demanda de alojamento e serviços para os trabalhadores das indústrias e os novos residentes atraídos pela oferta de empregos e serviços. Esse padrão é recorrente em cidades com forte influência econômica de polos industriais e

reflete a inter-relação entre o crescimento industrial e a transformação do espaço urbano.

4.3.2 Crescimento em Direção ao sul

O crescimento urbano em direção ao sul foi o menos expressivo. Essa região, caracterizada por áreas com maior cobertura vegetal e proximidade de corpos hídricos, como o rio Paraná, apresenta limitações físicas e ambientais para a urbanização. Estudos de sensoriamento remoto indicam que áreas com essas características tendem a ser menos impactadas pela expansão urbana devido a políticas de preservação ambiental ou condições adversas para construções. Apesar disso, há registros de crescimento pontual de infraestrutura pública, como escolas e pequenas comunidades residenciais, com menor intensidade em relação às demais direções.

4.3.3 Crescimento em Direção ao leste

A região leste demonstrou ser o principal eixo de expansão urbana de Três Lagoas ao longo do período estudado. O crescimento urbano nessa direção foi significativamente impulsionado pela proximidade com a rodovia BR-158, facilitando o transporte e a logística, além de concentrar áreas destinadas à habitação e comércio. A análise do NDBI mostra um aumento contínuo dos valores ao longo dos anos, refletindo a densificação das construções. Além disso, o leste recebeu investimentos em bairros planejados e infraestrutura básica, indicando um padrão de crescimento relativamente organizado, mas com impactos evidentes na redução de áreas vegetadas, conforme identificado pelos valores decrescentes de NDVI.

4.3.4 Crescimento em Direção ao oeste

O oeste apresentou um crescimento mais equilibrado e ordenado, com ampliação de áreas residenciais próximas ao centro da cidade. A proximidade com áreas consolidadas e a menor demanda por expansão industrial explicam o crescimento moderado. Essa direção concentrou projetos de infraestrutura social e melhorias urbanas, evidenciando uma expansão controlada em comparação ao norte e leste. O padrão observado é consistente com cidades que priorizam o planejamento para áreas centrais e consolidadas antes de expandir para zonas periféricas.

O padrão de expansão urbana identificado em Três Lagoas reflete as forças econômicas e sociais que moldam o crescimento das cidades médias no Brasil. A concentração de crescimento nas direções norte e leste está diretamente relacionada às atividades industriais e à infraestrutura logística, enquanto as regiões sul e oeste apresentam características de preservação ambiental ou crescimento controlado. A tendência de

urbanização mais intensa ao norte e ao leste evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas para o ordenamento territorial, mitigando os impactos ambientais e garantindo um desenvolvimento mais equilibrado.

As direções de maior crescimento, como norte e leste, sofrem com a redução da cobertura vegetal, como indicado pela análise do NDVI, o que implica em uma série de desafios ambientais. A perda de vegetação contribui para o aumento da impermeabilização do solo, alterando o ciclo hidrológico e favorecendo enchentes em períodos chuvosos. Além disso, a substituição das áreas verdes afeta o microclima local, intensificando o fenômeno de ilhas de calor urbano, como sugerem Medeiros et al. (2021).

A identificação dessas direções permite que gestores públicos priorizem ações em áreas críticas, como a recuperação de vegetação em zonas urbanas densificadas e o planejamento de corredores verdes que possam conectar fragmentos de vegetação remanescente. Além disso, o fortalecimento do planejamento urbano para o sul e oeste pode equilibrar a distribuição populacional, reduzindo a pressão sobre as áreas de maior expansão. Essa abordagem é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental, especialmente em cidades com grande dependência de atividades industriais, como Três Lagoas.

A análise das direções de crescimento urbano em Três Lagoas evidencia um padrão de desenvolvimento desbalanceado, com maior concentração nas direções norte e leste, impulsionado pelo setor industrial e logístico. Em contrapartida, o crescimento moderado no sul e oeste reflete características ambientais e sociais que limitam a urbanização. Essa compreensão reforça a necessidade de um planejamento territorial integrado, que considere tanto o crescimento econômico quanto a preservação ambiental, assegurando um futuro mais sustentável para a cidade.

4.4 Implicações para o Planejamento Urbano e Sustentabilidade

Os resultados deste estudo demonstram a importância de utilizar os índices NDVI e NDBI para monitorar a expansão urbana de forma integrada e detalhada, especialmente em cidades com forte crescimento industrial, como Três Lagoas. A aplicação da Correlação de Pearson complementou a análise, evidenciando a relação inversa entre urbanização e cobertura vegetal e fornecendo uma base quantitativa para a tomada de decisões no planejamento urbano sustentável. Como sugerido por Luz et al. (2019), essa abordagem fornece subsídios importantes para políticas públicas que considerem o impacto ambiental do desenvolvimento urbano e promovam a preservação de áreas verdes.

4.5 Discussão dos Impactos Ambientais

O estudo revelou que a expansão urbana de Três Lagoas está diretamente associada à perda de cobertura vegetal, gerando impactos ambientais significativos. A redução de áreas não impermeabilizadas implica na diminuição da evapotranspiração, o que pode alterar o balanço hídrico da região, conforme demonstrado por Silva (2022).

A substituição de vegetação por superfícies construídas, evidenciada pelos valores mais elevados de NDBI, contribui para o aumento das temperaturas locais, intensificando o efeito de ilhas de calor urbanas. Conforme apontado por Porangaba, Galvani e Amorim (2024), o processo de urbanização em Três Lagoas aumenta a retenção de calor em superfícies impermeáveis, bem como amplia o risco de ondas de calor, agravando as condições de vulnerabilidade socioambiental da população.

A diminuição da qualidade do ar e da biodiversidade devido à perda de vegetação urbana é outro ponto relevante a ser considerado. A vegetação atua na captura de carbono e na manutenção de habitats para a fauna. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2024), a urbanização afeta significativamente a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, reforçando a necessidade de medidas de mitigação que integrem a conservação ambiental às políticas urbanas.

5. CONCLUSÕES

A expansão urbana de Três Lagoas, fortemente impulsionada pelo desenvolvimento industrial, transformou significativamente a paisagem natural do município ao longo das últimas três décadas, resultando na redução da cobertura vegetal e no aumento das áreas construídas. A análise dos índices NDVI e NDBI demonstrou uma correlação negativa entre urbanização e vegetação, evidenciando que o crescimento urbano ocorreu em grande parte com a substituição da vegetação, especialmente após 2010, período marcado pela instalação de grandes indústrias de celulose. Esses resultados destacam a relevância de um planejamento territorial integrado, que equilibre o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental, priorizando ações como a proteção de áreas naturais remanescentes e a recuperação de regiões críticas.

O uso de ferramentas como o Google Earth Engine, combinado com índices espectrais, mostrou-se eficaz para monitorar e compreender as mudanças no uso e cobertura do solo, oferecendo subsídios para a formulação de políticas públicas que promovam uma urbanização mais consciente e sustentável. A manutenção de áreas verdes é essencial para mitigar os impactos negativos da urbanização, como mudanças no microclima, aumento do risco de enchentes e perda de biodiversidade, assegurando maior qualidade de vida para a população.

Recomenda-se que estudos futuros ampliem a análise para incluir variáveis socioambientais, como microclima e luminosidade noturna, além de avaliar a efetividade de políticas públicas voltadas para a sustentabilidade em cidades de médio porte com dinâmicas econômicas similares a Três Lagoas. Esses estudos complementares poderão contribuir para a construção de estratégias de desenvolvimento urbano resilientes e ambientalmente responsáveis.

6. REFERÊNCIAS

ALZHRANI, S. I.; ABDULSALAM, A.; ALAMOUDI, A. H.; ALSULAMI, H. A.; ALENEZI, M.

Remote Sensing-based assessment of urban sprawl and its environmental impacts in the Makkah Region, Saudi Arabia using NDVI and NDBI indices. **Journal of Environmental Management**, v.295, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113059.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Urbanização e biodiversidade: impactos e medidas de mitigação**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/noticia-acom-2014-11-594>. Acesso em: 25 nov. 2024.

GALVÃO, Jonilson Michel Fontes; FERNANDES, Wanessa Monteiro; MARTINS, Antônio César Germano; SILVA, Darllan Collins da Cunha e. Comparação de diferentes descritores de imagens do CBERS 4A para a classificação da cobertura do solo com uma Random Forest. 44, 2023. Disponível em: <https://meioambientepocos.com.br/Anais2023/44-COMPARA%C3%87%C3%83O%20DE%20DIFERENTES%20DESCRITORES%20DE%20IMAGENS%20DO%20CBERS%204A%20PARA%20A%20CLASSIFICA%C3%87%C3%83O%20DA%20COBERTURA%20DO%20SOLO%20COM%20UMA%20RANDOM%20FOREST.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2024.

GHOSH, Sujit et al. Monitoring urban growth and land use change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Kolkata, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, v. 22, n. 2, p. 203-216, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.05.004>. Acesso em: 04 dez. 2024.

GOMES, Lennon. *Uso e ocupação do solo das áreas verdes urbanas na cidade de Três Lagoas - MS*. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2020. Disponível em: https://ppggeografiacptl.ufms.br/files/2021/03/DISSERTACAO_FINAL___LENNON_GOMES___2020.pdf. Acesso em: 3 dez. 2024.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R.

Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geografia e Meio Ambiente: expansão urbana e seus impactos. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=448542>. Acesso em: 14 nov. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 11 out. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas de setores censitários e divisões intramunicipais**. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html>. Acesso em: 26 nov. 2024.

KAYA, Ş.; DERVIŞOĞLU, A. Use of NDBI and NDVI for urban growth monitoring in Istanbul.

International Journal of Environment and Geoinformatics, v. 7, n. 2, p. 1-10, 2020.

KOKO, Auwalu Faisal; YUE, Wu; ABUBAKAR, Ghali Abdullahi; ALABSI, Akram Ahmed Noman; HAMED, Rokniasadeh. Influência espaço-temporal da dinâmica de mudança do uso/cobertura do solo na ilha de calor urbana de superfície: um estudo de caso da metrópole de Abuja, Nigéria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 10, n. 272, p. 1-25, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050272>. Acesso em: 05 dez. 2024

LI, P.; JIANG, L.; FENG, Z. Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) sensors. **Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 310-329, 2013.

MENDONÇA, Marcelo Ribeiro de; TEIXEIRA, Jodenir Calixto; MARIANO, Amanda Júlia de Freitas; MEDEIROS, Gabriela Nogueira de. **O município de Três Lagoas/MS como maior produtor/exportador de celulose do mundo: a ideologia do progresso e suas contradições**. *Caderno Prudentino de Geografia*, Presidente Prudente, v. 42, n. 3, p. 50-76, jul./dez. 2020. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/7200/5720>. Acesso em: 4 dez. 2024.

MESQUITA, Felipe Nunes. *O uso e as implicações dos recursos hídricos no desenvolvimento urbano de Três Lagoas*. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/9883/1/2014_FelipeNunesMesquita.pdf. Acesso em: 03 dez. 2024.

MOORE, D. S.; MCCABE, G. P.; CRAIG, B. A. **Introduction to the Practice of Statistics**. 10. ed. New York: W.H. Freeman, 2021.

OLIVEIRA, J. L. M. de; NETO, S. P. G. de C.; SILVA, J. B. L. da. Avaliação das mudanças no uso e ocupação do solo do Município de Eunápolis-BA através da análise da eficiência dos índices espectrais de NDVI, NDBI e Built-Up. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87529-87544, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-084>. Acesso em: 11 out. 2024.

OLIVEIRA, J. L. M. de; NETO, S. P. G. de C.; SILVA, J. B. L. da. Avaliação das mudanças no uso e ocupação do solo do Município de Eunápolis-BA através da análise da eficiência dos índices espectrais de NDVI, NDBI e Built-Up. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87529-87544, 2021.

PORANGABA, G. F. O.; GALVANI, E.; AMORIM, M. C. de C. T. Ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas, MS: análise pela ótica do risco e da vulnerabilidade socioambiental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, n. 20, p. 275–

296, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.18319>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, v. 1, p. 309-317, 1974.

ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R.; SCAMBOS, T. A.; SCHAAF, C. B.; SCHOTT, J. R.; SHENG, Y.; VERMOTE, E. F.; BELWARD, A. S.; BINDSCHADLER, R. A.; COHEN, W. B.; GAO, Z.; MASEK, J. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154-172, 2014.

SETO, Karen C.; GÜNERALP, Burak; HUTYRA, Lucy R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 40, p. 16083-16088, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>. Acesso em: 03 dez. 2024.

SILVA, João Luiz. *Os efeitos territoriais da expansão do capital e a transformação do espaço urbano na cidade de Três Lagoas-MS entre os anos de 2000 a 2020*. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/3912>. Acesso em: 5 dez. 2024.

SILVA, João Luiz da. *A expansão do capital e as transformações do espaço urbano na cidade de Três Lagoas-MS entre os anos de 2000 a 2020*. 2022. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/bitstream/123456789/3912/1/TEXT0%20FINAL%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%201.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2024.

SINGH, P.; PATHAK, V.; KUMAR, S. Land Use Land Cover (LULC) classification and change detection analysis using NDVI and NDBI indices for sustainable urban planning. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 12, 2020. DOI: 10.1007/s10661-020-08686-y.

WANG, Y.; CHEN, Z.; ZHU, L.; ZHANG, Y.; CHEN, J. Monitoring urban expansion and green space loss using combined NDVI and NDBI based on multi-temporal Landsat data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, 2021. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100501.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.

