

Cidades Inteligentes e Resiliência Climática: O Papel da Vegetação Urbana na Regulação Térmica e Sequestro de Carbono em Ribeirão Preto, SP

Matheus Felipe Conceição Alves Lima

Mestrando, UNINOVE, Brasil
matheusfelipelima1@gmail.com
ORCID iD 0000-0002-9486-9174

Patrícia do Prado Oliveira

Doutora em Ciências, USP, Brasil
patricia.prado@uni9.edu.br
ORCID iD 0000-0001-5021-6318

Cristiano Capellani Quaresma

Professor Doutor, UNINOVE, Brasil
quaresmacc@uni9.pro.br
ORCID iD 0000-0002-9486-9174

Cidades Inteligentes e Resiliência Climática: O Papel da Vegetação Urbana na Regulação Térmica e Sequestro de Carbono em Ribeirão Preto, SP

RESUMO

Objetivo: Este estudo visa analisar o papel da vegetação urbana na mitigação das ilhas de calor e no sequestro de carbono (SC) em Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Metodologia - Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, aplicando técnicas de sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e geoprocessamento. Foram calculados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o fluxo de CO₂ (CO₂FLUX) e as temperaturas de superfície para avaliar a correlação entre cobertura vegetal, temperatura e sequestro de carbono.

Originalidade/relevância - O estudo preenche uma lacuna na literatura sobre o impacto direto da vegetação urbana na regulação climática em cidades brasileiras de médio porte, oferecendo evidências quantitativas do papel das áreas verdes no SC e na redução das temperaturas urbanas.

Resultados - As áreas com maior cobertura vegetal apresentaram índices elevados de SC e temperaturas superficiais reduzidas, enquanto regiões urbanas e agrícolas com pouca vegetação registraram maior aquecimento.

Contribuições teóricas/metodológicas O estudo aprimora o uso de técnicas de sensoriamento remoto para avaliação ambiental urbana, demonstrando a eficácia de indicadores como NDVI e CO₂FLUX na análise de serviços ecossistêmicos.

Contribuições sociais e ambientais - Os achados sustentam a formulação de políticas públicas voltadas para a ampliação de áreas verdes urbanas, promovendo a sustentabilidade, a qualidade de vida e a mitigação das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto. Sequestro de Carbono. Temperatura de Superfície. Índice de Vegetação. Ribeirão Preto.

Smart Cities and Climate Resilience: The Role of Urban Vegetation in Thermal Regulation and Carbon Sequestration in Ribeirão Preto, SP

ABSTRACT

Objective – This study aims to analyze the role of urban vegetation in mitigating heat islands and carbon sequestration (CS) in Ribeirão Preto, SP, Brazil.

Methodology – Landsat 8 satellite images were used, applying remote sensing techniques, Geographic Information Systems (GIS), and geoprocessing. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), CO₂ flux (CO₂FLUX), and surface temperatures were calculated to assess the correlation between vegetation cover, temperature, and carbon sequestration.

Originality/Relevance – This study addresses a gap in the literature regarding the direct impact of urban vegetation on climate regulation in medium-sized Brazilian cities, providing quantitative evidence of the role of green areas in CS and urban temperature reduction.

Results – Areas with greater vegetation cover exhibited higher CS indices and reduced surface temperatures, while urban and agricultural regions with sparse vegetation recorded higher warming levels.

Theoretical/Methodological Contributions – The findings support public policy formulation aimed at expanding urban green areas, promoting sustainability, improving quality of life, and mitigating climate change.

Social and Environmental Contributions – Indicate the main social and environmental implications resulting from the study's findings.

KEYWORDS: Remote Sensing. Carbon Sequestration. Surface Temperature. Vegetation Index. Ribeirão Preto.

Ciudades Inteligentes y Resiliencia Climática: El Papel de la Vegetación Urbana en la Regulación Térmica y el Secuestro de Carbono en Ribeirão Preto, SP

RESUMEN

Objetivo – Este estudio tiene como objetivo analizar el papel de la vegetación urbana en la mitigación de las islas de calor y en el secuestro de carbono (SC) en Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Metodología – Se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8, aplicando técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y geoprocésamiento. Se calcularon el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el flujo de CO₂ (CO₂FLUX) y las temperaturas de superficie para evaluar la correlación entre la cobertura vegetal, la temperatura y el secuestro de carbono.

Originalidad/Relevancia – El estudio aborda una laguna en la literatura sobre el impacto directo de la vegetación urbana en la regulación climática en ciudades brasileñas de tamaño medio, proporcionando evidencia cuantitativa del papel de las áreas verdes en el SC y la reducción de las temperaturas urbanas.

Resultados – Las áreas con mayor cobertura vegetal presentaron índices más altos de SC y temperaturas superficiales reducidas, mientras que las regiones urbanas y agrícolas con escasa vegetación registraron un mayor calentamiento.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio mejora la aplicación de técnicas de teledetección para la evaluación ambiental urbana, demostrando la eficacia de indicadores como NDVI y CO₂FLUX en el análisis de servicios ecosistémicos.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Los hallazgos respaldan la formulación de políticas públicas orientadas a la expansión de las áreas verdes urbanas, promoviendo la sostenibilidad, mejorando la calidad de vida y mitigando el cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Teledetección. Secuestro de Carbono. Temperatura de Superficie. Índice de Vegetación. Ribeirão Preto.

1 INTRODUÇÃO

O sequestro de carbono (SC) é o processo de remoção de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e seu armazenamento em reservatórios bióticos e pedológicos (IPCC, 2001; Olson et al., 2014). A vegetação desempenha papel fundamental nesse processo, convertendo o carbono atmosférico em carbono orgânico durante a fotossíntese (Amaral; Costa; Muzzi, 2017; Trindade et al., 2021). O SC é considerado um serviço ecossistêmico essencial, pois contribui para a regulação climática e para o bem-estar humano, além de atuar diretamente na manutenção e estabilidade dos processos ecossistêmicos (Parron e Garcia, 2015; Reid et al., 2005; Westman, 1977).

Com o avanço da crise climática global, o SC tem se tornado cada vez mais relevante como estratégia para mitigar os efeitos do aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. Diversos países, incluindo o Brasil, assumiram compromissos na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21) para reduzir as emissões de GEE (Brasil, 2021). Como sexto maior emissor de GEE do mundo, o Brasil possui grande potencial para contribuir com essas metas, especialmente por meio da preservação e expansão de suas áreas verdes (Artaxo, 2022).

O contexto urbano é especialmente relevante nessa discussão, pois é onde reside a maior parte da população mundial (ONU, 2022) e onde se concentram grandes emissões de GEE (IPCC, 2023). No Brasil, aproximadamente 85% da população vive em áreas urbanas (IBGE, 2011), o que ressalta a importância de soluções sustentáveis nas cidades para a melhoria da qualidade de vida. As áreas verdes urbanas desempenham um papel vital na remoção de carbono da atmosfera, regulação climática e mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbanas (ICU) (Griscom et al., 2018; Jatou et al., 2022; Lin et al., 2011; Shishegar, 2014).

Neste contexto, as cidades inteligentes emergem como soluções promissoras, integrando tecnologia, sustentabilidade e planejamento urbano para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos. O uso de ferramentas como o sensoriamento remoto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o geoprocessamento possibilita o monitoramento eficiente da cobertura vegetal e da dinâmica térmica urbana, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas eficazes.

Assim, o presente artigo tem como objetivo analisar a influência da vegetação urbana na mitigação das ilhas de calor urbanas e no sequestro de carbono no município de Ribeirão Preto (SP). Para isso, foram empregadas técnicas de sensoriamento remoto orbital, SIG e geoprocessamento, destacando a contribuição dessas tecnologias para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O sequestro de carbono (SC) consiste na remoção do dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e seu armazenamento em reservatórios terrestres, como a vegetação e o solo. Esse processo desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, pois contribui para a redução da concentração de CO₂ na atmosfera e, conseqüentemente, do efeito estufa (Pan et al., 2011; Smith, 2004).

As discussões sobre o SC remontam à década de 1970, com os trabalhos pioneiros de Whittaker e Likens (1973), que analisaram a capacidade das florestas de remover carbono da atmosfera e destacaram a importância dos ecossistemas terrestres na regulação do ciclo do carbono. Posteriormente, Houghton et al. (1983) demonstraram o impacto do uso do solo nos estoques de carbono, evidenciando como o desmatamento e a conversão de áreas florestais afetam os níveis de CO₂ atmosférico.

A partir da década de 1990, o SC ganhou maior relevância no cenário internacional, impulsionado por acordos como o Protocolo de Quioto (Nações Unidas, 1998), que estabeleceu metas para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, o SC passou a ser reconhecido como uma estratégia importante para mitigar as mudanças climáticas (Gomes, 2005; Nações Unidas, 1998).

Para quantificar o SC, diversas metodologias podem ser empregadas, incluindo métodos de campo e de sensoriamento remoto (Tadese et al., 2019). Os métodos de campo envolvem a coleta de dados diretamente nas áreas de estudo, podendo ser destrutivos ou não destrutivos. Os métodos destrutivos, como a análise da biomassa de árvores (Kong et al., 2014), requerem a remoção de partes da vegetação para análise em laboratório. Já os métodos não destrutivos, como a medição de parcelas amostrais e o uso de equações alo métricas (Montès et al., 2000; Zhao et al., 2023), permitem estimar o SC sem danificar a vegetação.

O sensoriamento remoto tem se destacado como uma ferramenta importante para a análise do SC, pois possibilita a aquisição de dados em larga escala de forma rápida e eficiente (Meneses & Almeida, 2012). Essa técnica utiliza sensores instalados em satélites ou aeronaves para captar informações sobre a superfície terrestre, como a refletância da vegetação, que pode ser utilizada para calcular índices de vegetação (NDVI) e estimar o fluxo de carbono (CO₂FLUX) (Formigoni et al., 2011; Zhang & Shao, 2021).

Comparadas aos métodos de campo, as técnicas de sensoriamento remoto apresentam vantagens como a rapidez na aquisição de dados, o menor custo e a possibilidade de analisar grandes áreas de forma contínua (Formigoni, Xavier & de Souza Lima, 2011; Zhang & Shao, 2021). No entanto, o sensoriamento remoto também apresenta limitações, como a influência das condições atmosféricas na qualidade dos dados, a necessidade de calibração e validação dos modelos utilizados e a realização de processamentos e análises sofisticadas. Além disso, os resultados obtidos podem ser influenciados pela resolução espacial dos sensores, o que pode limitar a precisão das medições. Apesar dessas limitações, as vantagens do sensoriamento remoto se sobressaem, especialmente quando diferentes técnicas são combinadas para a quantificação de variáveis (Dossa & Miassi, 2024).

As técnicas de sensoriamento remoto também têm sido amplamente empregadas no planejamento urbano e regional, pois permitem a análise de múltiplas variáveis, como temperatura da superfície, índices de vegetação e uso do solo, utilizando um mesmo conjunto de dados (Almeida, 2010).

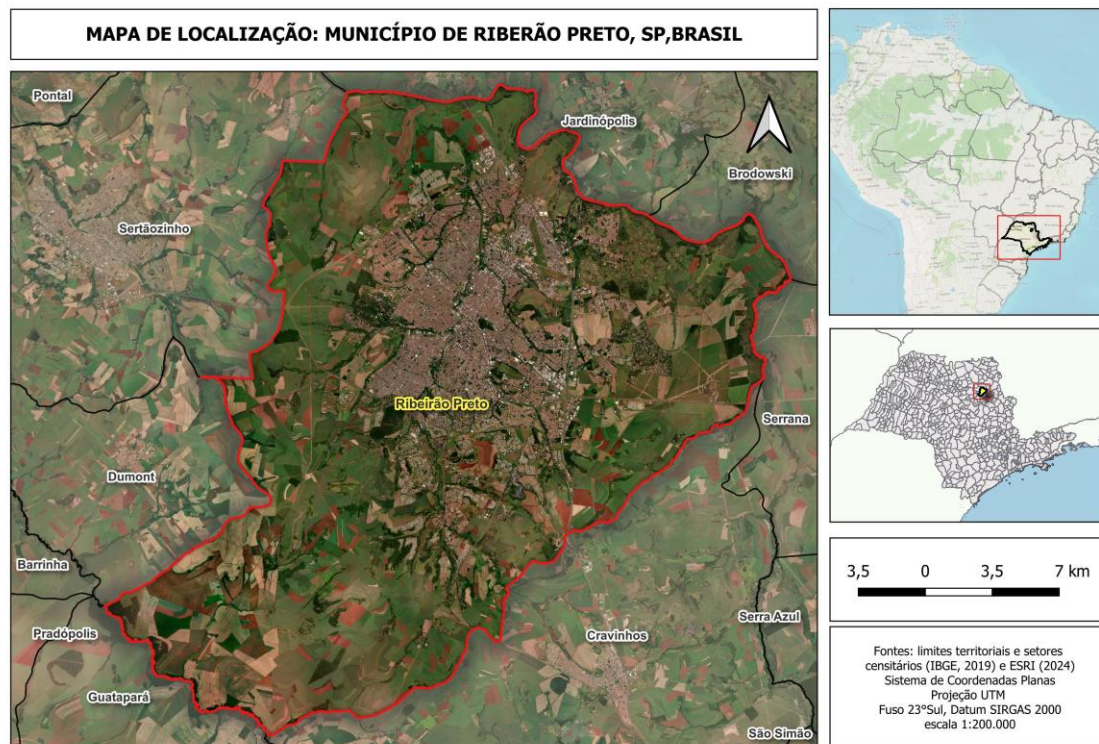
3 MÉTODO

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Ribeirão Preto, localizado na região nordeste do Estado de São Paulo, sudeste do Brasil, com área total de 651 km² (Figura 1). A população

estimada é de 698.642 habitantes, sendo a oitava maior do estado (IBGE, 2024). De acordo com os dados do IBGE, a maioria da população (99,7%) reside na área urbana do município (Ribeirão Preto, 2024a).

Figura 1 – Mapa do Município de Ribeirão Preto (SP), Brasil.



Fonte: os autores.

Ribeirão Preto está situado em uma zona de transição entre a Floresta Estacional Semidecidual e o Cerrado. A vegetação se caracteriza pela queda das folhas durante os períodos de maior seca (Kotchetkoff-Henriques, 2003; Veloso, Rangel Filho, Lima, 1991). O clima é tropical, com verões chuvosos e invernos secos. As temperaturas médias variam de 19 °C no inverno a 25 °C no verão (Rolim et al., 2007). A precipitação anual é de aproximadamente 1400 mm, concentrada entre outubro e março (80% das chuvas), enquanto o período de junho a agosto é mais seco (5% das chuvas) (IPT, 1999).

3.2 Estimativa dos fluxos de carbono

As análises foram realizadas com imagens de alta resolução espacial obtidas pelo satélite Landsat 8, sensor OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), disponibilizadas pela plataforma EarthExplorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (USGS, 2024). O Programa Landsat tem como objetivo o monitoramento contínuo da superfície terrestre, com aplicações em áreas como meio ambiente, uso do solo, agricultura, hidrologia, geologia, florestas e áreas urbanas (Acharya e Yang, 2015).

Para este estudo, foram utilizadas as seguintes bandas espectrais do Landsat 8:

- Banda 2 - Visível Azul (0.450 - 0.51 μm) 30 m;
- Banda 3 - Visível Verde (0.53 - 0.59 μm) 30 m;
- Banda 4 - Visível Vermelho (0.64 - 0.67 μm) 30 m;

- Banda 5 - Infravermelho Próximo (0.85 - 0.88 μm) 30 m;
- Banda 10 - Infravermelho Termal/TIRS 1 (10.6 - 11.19 μm) 100 m, reamostrada para 30 m.

As imagens foram processadas no software QGIS, incluindo as etapas de reprojeção, recorte da área de estudo e calibração radiométrica (Coelho e Correa, 2013).

O método CarbonFlux baseia-se na combinação de dados de sensoriamento remoto e medições *in situ* para estimar fluxos de carbono, permitindo identificar a taxa de fotossíntese líquida em paisagens vegetadas, como parques urbanos (RAHMAN, A. F. et al. 2000).

A estimativa é construída a partir da combinação de dois parâmetros:

- Absorção de Radiação Ativa Fotossintética (APAR): Representada pelo índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que quantifica a absorção de luz pela vegetação.
- Eficiência do Uso de Radiação Fotossintética (LUE): Captada pelo índice PRI (Photochemical Reflectance Index), que reflete variações em pigmentos xantofilados, indicadores da atividade fotossintética.

3.2.1 Temperatura de Superfície

A banda 10 do Landsat 8 foi utilizada para a geração do mapa de temperatura de superfície. Inicialmente, foi realizada a correção atmosférica da imagem. Posteriormente, a temperatura de brilho foi convertida em temperatura da superfície (LST), utilizando modelos físicos que consideram as propriedades térmicas da superfície (Coelho e Correa, 2013). Para o Landsat 8, utilizando a banda térmica 10, a equação comum é:

$$LST = \frac{K2}{\ln \left(\frac{K1}{(DN * M + A)} + 1 \right)} - 273.$$

Onde:

LST: Temperatura de superfície (Land Surface Temperature).

DN: Valor digital da banda térmica.

M e A: Coeficientes de calibração para converter o valor digital em radiância espectral.

3.2.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI, indicador da quantidade e vigor da vegetação, foi calculado utilizando as bandas 4 (Vermelho) e 5 (Infravermelho Próximo) do Landsat 8. O NDVI está relacionado à biomassa e ao potencial de sequestro de carbono, sendo calculado a partir da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(NIR - Vermelho)}{(NIR + Vermelho)}$$

Onde:

NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index).

NIR: Refletância na banda do infravermelho próximo (Near Infrared).

Vermelho: Refletância na banda do vermelho (Red).

O NDVI varia entre -1 e 1. Valores próximos de 1 indicam alta densidade de vegetação, enquanto valores próximos de -1 correspondem a áreas com pouca ou nenhuma vegetação (como corpos d'água ou solo exposto). Valores próximos de zero indicam áreas com cobertura de nuvens ou solo.

3.2.3 Índice de Fotossíntese Espectral Simplificado (sPRI)

O Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (GAMON et al., 1997 apud Santos, 2017) é um índice utilizado para estudos de vegetação que utiliza as bandas azul e verde de imagens de satélite para estimar a atividade fotossintética das plantas. Ele é particularmente sensível a mudanças nos pigmentos fotossintéticos, como a clorofila e os carotenoides, além de se relacionar com o uso eficiente da luz durante o processo de fotossíntese (Baptista, 2003). Alterações na proporção desses pigmentos podem indicar mudanças na eficiência fotossintética. O PRI precisa de um reescalonamento evitando dados negativos gerando o Índice de Fotossíntese Espectral Simplificado (sPRI).

$$PRI = \frac{(Azul - Verde)}{(Azul + Verde)}$$

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2}$$

Onde:

PRI: Índice de Reflectância Fotoquímica.

sPRI: Índice de Fotossíntese Espectral Simplificado.

Banda 2 (Azul): sensível às mudanças nos pigmentos de carotenoides, relacionados à fotossíntese.

Banda 3 (Verde): Também utilizada para o cálculo do PRI, em conjunto com a banda azul.

3.2.4 Fluxo de CO₂ (CO2FLUX)

O CO2FLUX trata-se de um importante indicador da capacidade fotossintética da vegetação e, conseqüentemente, do seu potencial de sequestro de carbono. Essa ferramenta tem sido útil na análise de dados de sensoriamento remoto.

Esse índice espectral é calculado a partir de outros índices, a saber, o NDVI e o sPRI (Rahman et al., 2000). Ele busca determinar a taxa relativa da capacidade fotossintética da vegetação, estabelecendo uma conexão direta com os processos de captura e fixação do carbono atmosférico.

$$CO2FLUX = NDVI * sPRI$$

Onde:

CO2FLUX: Fluxo de CO₂

NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

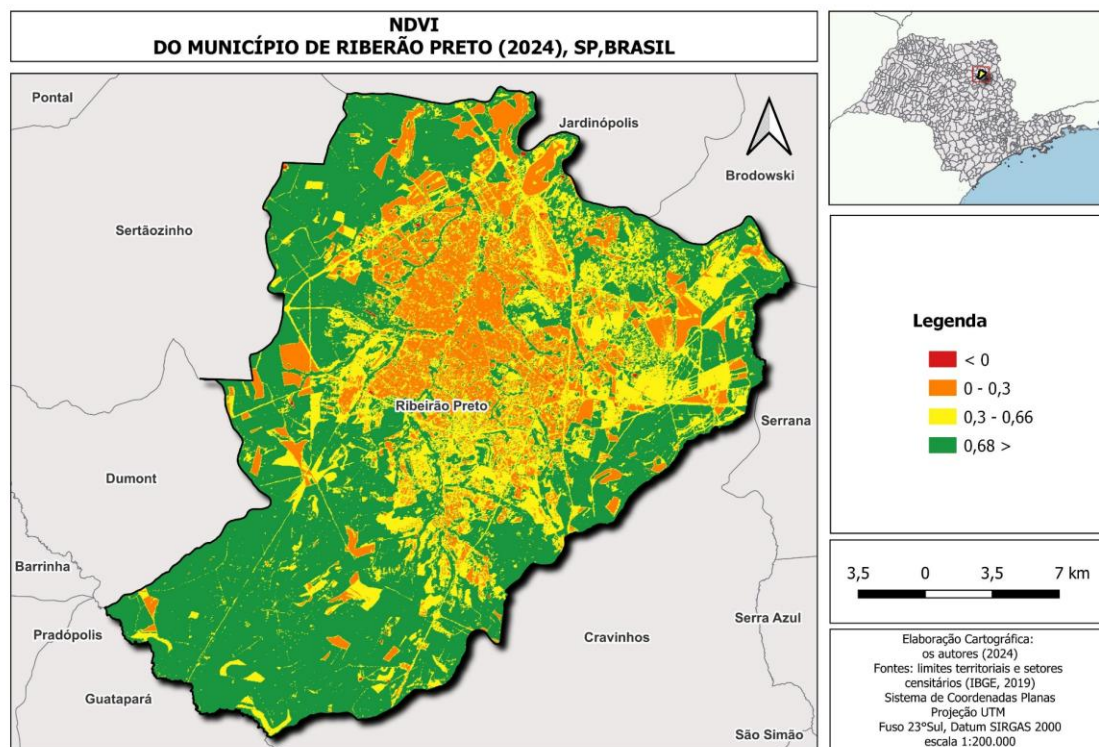
SPRI: Índice de Reflectância Fotoquímica Simplificado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo analisou o papel da vegetação urbana na mitigação das ilhas de calor e no sequestro de carbono em Ribeirão Preto (SP), utilizando técnicas de sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e geoprocessamento. A partir da análise de índices espectrais como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o CO2FLUX, além da temperatura de superfície, foi possível identificar a correlação entre a densidade de cobertura vegetal, o potencial de sequestro de carbono e a regulação térmica urbana.

Os resultados do NDVI (Figura 2) mostraram uma variabilidade significativa na cobertura vegetal do município.

Figura 2 – Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para Ribeirão Preto (SP), Brasil



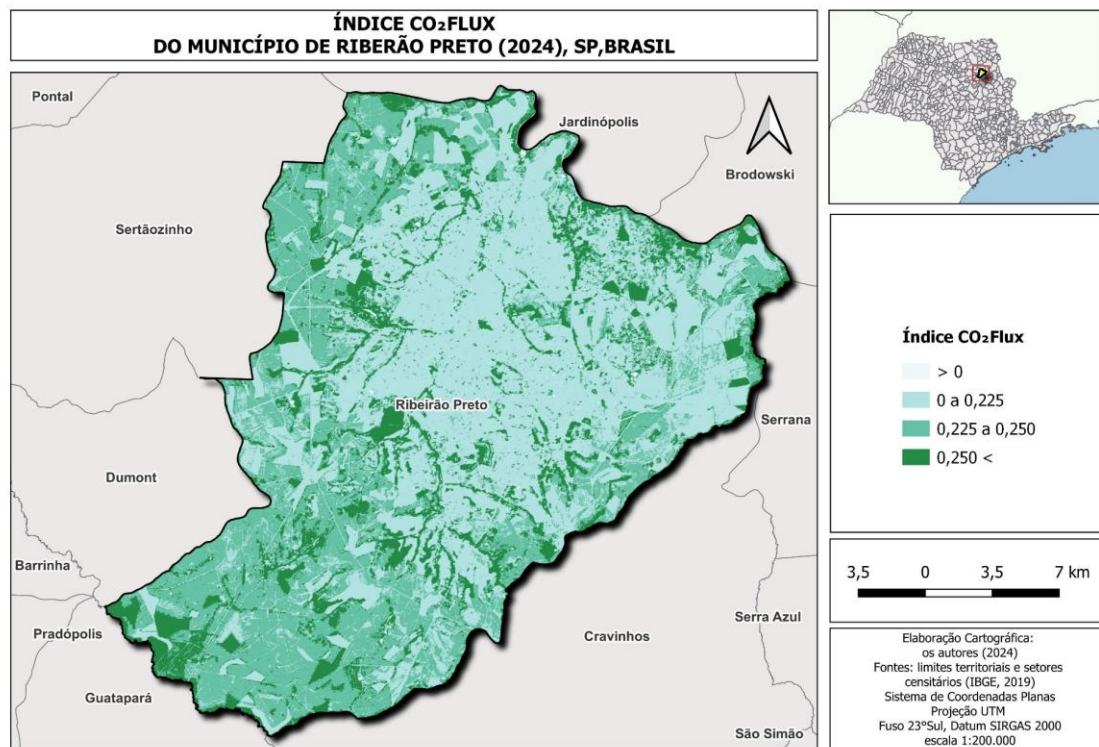
Fonte: os autores.

Os resultados do NDVI (Figura 2) foram classificados em 4 intervalos: classes menores que zero que indicam vegetação sem atividade e alvos não-vegetais, solo exposto e áreas urbanizadas com grande quantidade de pavimentação; entre 0 e 0,3 (laranja), representando áreas com pouca vegetação, como zonas urbanas e industriais pavimentadas e edificadas, áreas de cultivo em estágio inicial e solo parcialmente exposto; entre 0,3 e 0,66 (amarelo), que identifica vegetação de densidade moderada, como campos agrícolas em crescimento

intermediário e vegetação urbana moderada em parques e praças; e entre 0,66 e 1 (verde), a vegetação plenamente sadia ou em um estágio avançado de desenvolvimento, incluindo mosaicos florestais, áreas protegidas como unidades de conservação, vegetação ripária e áreas de cultivo em estágio avançado.

A partir dos índices NDVI e sPRI, foi gerado o Índice de CO₂ flux (Figura 3) que indicou as áreas com o maior potencial de sequestro de carbono no município.

Figura 3 – Mapa do Índice CO₂FLUX para Ribeirão Preto (SP), Brasil



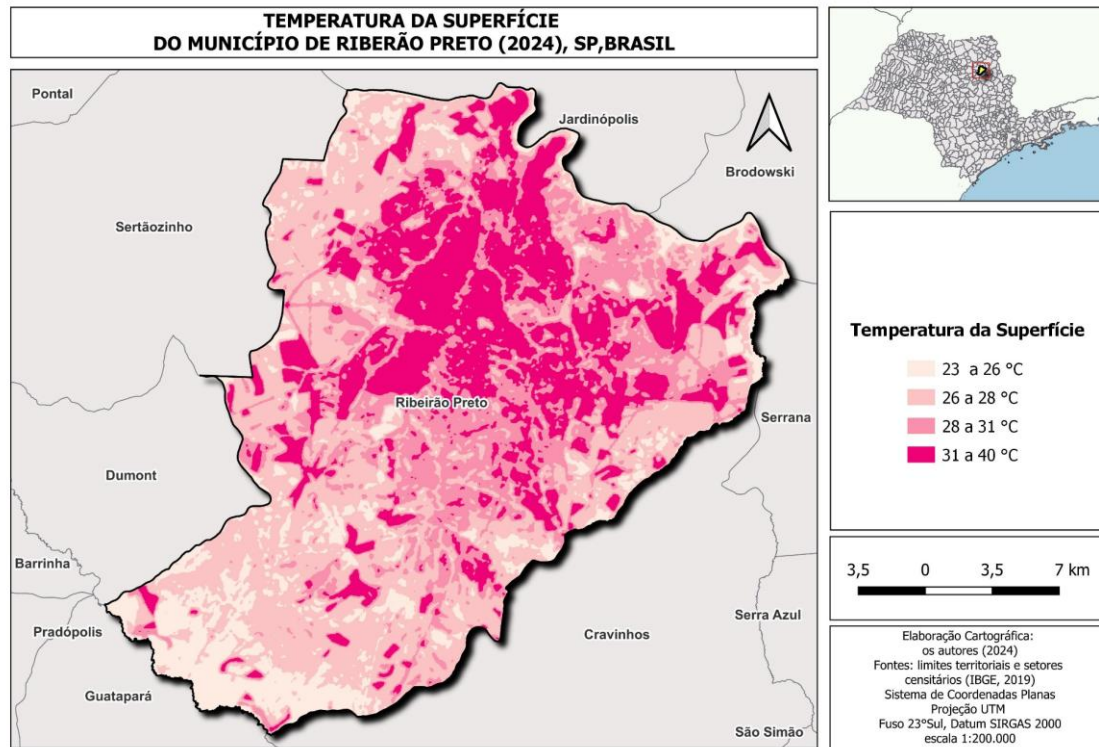
Fonte: os autores.

Os resultados corroboram os estudos de Yin et al. (2022), que observaram maior sequestro de carbono em áreas florestadas em comparação com áreas agrícolas e de pastagem. Observa-se que as áreas com os maiores índices de CO₂FLUX foram encontradas nas franjas do centro urbano da cidade. As áreas em que há maior sequestro de carbono são: zona sul, representada pela Estação Ecológica de Ribeirão Preto, com 154 ha de extensão (São Paulo, 2010); zona oeste, com o campus da Universidade de São Paulo (USP), com uma área de cerca de 168,95 hectares de vegetação (USP, 2019; Varanda, De Oliveira, Barosela, 2005), e porções da região leste, onde está situado o Parque Municipal Prefeito Luiz Roberto Jábali e outros fragmentos de vegetação e florestas ripárias com grande vigor.

Outra área que apresentou valores elevados para CO₂FLUX está localizada próxima ao centro da cidade, sendo está composta por duas Unidades de Conservação, a Área de Proteção Ambiental (APA) Parque Municipal Morro do São Bento e a APA Estadual Morro do São Bento (Ribeirão Preto, 2024b; São Paulo, 2024). Os resultados observados para estas áreas densamente florestadas indicam maior eficiência no sequestro de carbono, resultados semelhantes aos avaliados por Andrade et al., (2023) em Áreas de Preservação em São Gonçalo (RJ), Baptista, (2003) em ambientes tropicais de cerrado. Rowntree e Nowak, (1991) também

observaram a relação entre o sequestro de carbono e as áreas de diferentes níveis de cobertura florestal nas florestas urbanas dos Estados Unidos, destacando que áreas com maior densidade de árvores apresentam maior capacidade de armazenar e sequestrar carbono.

Figura 4 – Mapa de Temperatura de Superfície para Ribeirão Preto (SP), Brasil.



Fonte: os autores.

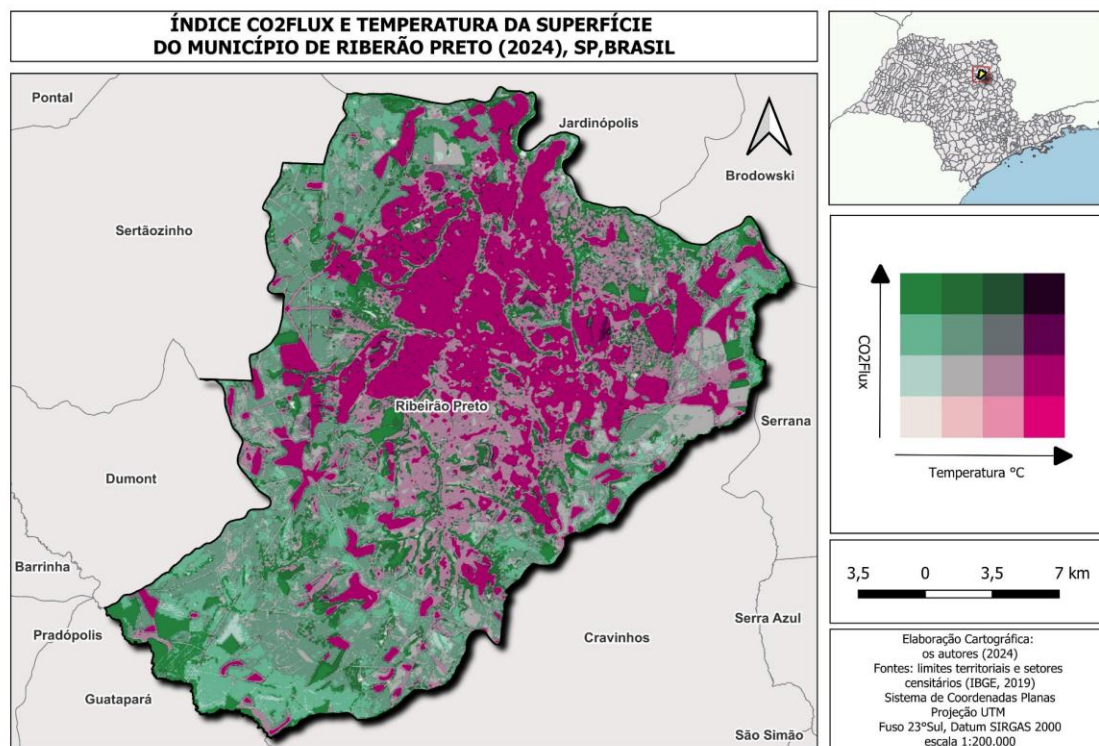
O mapa de temperatura de superfície (Figura 4) revela a ocorrência de ilhas de calor urbanas em Ribeirão Preto. Os resultados desse mapeamento também foram representados em quatro classes, usando igual contagem (Quartil), sendo elas de 23 a 26 °C, 26 a 28 °C, 28 a 31 °C e 31 a 40°C. As temperaturas mais elevadas (rosa escuro), concentram-se nas áreas com maior adensamento urbano e em áreas agrícolas com solo exposto, o que corrobora os achados de Gomes et al., (2021). Por outro lado, as áreas com maior cobertura vegetal, principalmente na zona sul, extremo oeste e leste do município, apresentam temperaturas mais amenas, constituindo-se ilhas de frescor.

Para a maior compreensão desta correlação espacial entre as duas variáveis, o Índice de CO2 flux e as Temperaturas da Superfície, foi gerado um mapa de legenda bivariada no qual é possível identificar a intensidade da manifestação das mesmas a partir da identificação de cada tonalidade presente na escala de cores (Figura 5).

Ao analisar conjuntamente o índice CO2FLUX com as temperaturas de superfície, é possível notar uma forte correlação entre os níveis de sequestro de carbono e as temperaturas de superfície. As áreas com maior cobertura vegetal, especialmente aquelas com vegetação arbórea, tendem a ter temperaturas de superfície mais baixas e níveis de carbono armazenado mais elevados, conforme indicado pelo índice de CO2FLUX. Essas áreas atuam como reguladoras térmicas e contribuem para a mitigação do efeito de ilhas de calor, ao diminuir as temperaturas locais e favorecer o sequestro de carbono.

Enquanto isso, as áreas com maior concentração populacional, especialmente nas áreas norte, oeste, central e parte da região leste, apresentam temperaturas de superfície mais elevadas. Essas áreas apresentam baixa cobertura vegetal, o que resulta em uma maior absorção e retenção de calor, devido à predominância de superfícies construídas, como concreto e asfalto, que possuem uma elevada capacidade de armazenamento térmico e pouca refletância.

Figura 4 – Mapa representativo da correlação entre Temperatura de Superfície e CO2FLUX para Ribeirão Preto (SP), Brasil.



Fonte: os autores.

Essa relação inversa entre vegetação, sequestro de carbono e temperatura de superfície também foi observada por Zhang et al., (2020), que analisaram a bacia hidrográfica das usinas hidrelétricas de Ludila e Guanyinyan na China, bem como pelos achados de Nova et al., (2021), que estudaram as relações entre ilhas de calor e índices de vegetação em Recife (PE).

No mesmo sentido, Oliveira, Ganem e Baptista (2017) demonstraram a importância das áreas vegetadas na atenuação das temperaturas de superfície em áreas urbanas, ressaltando o papel do sequestro de carbono nesse processo, nos municípios de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou a importância da vegetação urbana na mitigação das ilhas de calor e no sequestro de carbono em Ribeirão Preto (SP), destacando o papel fundamental das áreas verdes na regulação climática urbana. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e geoprocessamento demonstrou ser uma abordagem

eficaz para o monitoramento ambiental, fornecendo subsídios valiosos para o planejamento urbano sustentável.

Os resultados obtidos mostraram que as regiões com maior cobertura vegetal apresentaram níveis mais elevados de sequestro de carbono e temperaturas de superfície significativamente reduzidas. Em contraste, áreas urbanas densamente construídas e com pouca vegetação registraram temperaturas mais altas, corroborando a existência de ilhas de calor urbanas. Esses achados reforçam a necessidade de expansão e preservação das áreas verdes nas cidades como estratégia essencial para a promoção da resiliência urbana e a melhoria da qualidade de vida.

No contexto das cidades inteligentes, este estudo contribui para a integração de tecnologias avançadas no monitoramento e gestão ambiental. A aplicação de ferramentas como o sensoriamento remoto e o SIG permite uma análise precisa e em tempo real das condições ambientais, facilitando a tomada de decisões baseadas em evidências. Além disso, os resultados podem subsidiar a formulação de políticas públicas inovadoras voltadas para a sustentabilidade urbana, promovendo a equidade socioambiental e o enfrentamento das mudanças climáticas.

As contribuições deste estudo vão além do âmbito acadêmico, impactando diretamente o planejamento urbano e a formulação de estratégias para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes. A experiência de Ribeirão Preto pode servir de referência para outras cidades de médio porte no Brasil e no mundo, demonstrando a importância da integração entre tecnologia, meio ambiente e planejamento urbano.

Assim, conclui-se que a promoção da sustentabilidade urbana depende, em grande parte, da capacidade das cidades de integrar soluções tecnológicas com a gestão eficiente dos recursos naturais, fortalecendo a resiliência e a qualidade de vida da população urbana. O incentivo à ampliação de áreas verdes e ao uso de tecnologias de monitoramento ambiental deve ser visto como uma prioridade nas agendas de desenvolvimento urbano inteligente e sustentável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, T. D.; YANG, I. Exploring Landsat 8. **International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research**, v. 4, n. 4, p. 4–10, 2015.

ALMEIDA, C. M. DE. Aplicação dos sistemas de sensoriamento remoto por imagens e o planejamento urbano regional. **Arq.Urb**, n. 3, p. 98–123, 2010.

AMARAL, R.; COSTA, S. D. A. P.; MUZZI, M. R. S. O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos. **Paisagem e Ambiente**, n. 39, p. 163, 2017.

ANDRADE, G. C. N. et al. Análise do índice CO2FLUX em áreas de preservação ambiental em São Gonçalo - RJ. **Revista Continentes (UFRRJ)**, n. 22, p. 86–103, 2023.

ARTAXO, P. Mudanças climáticas: caminhos para o Brasil: a construção de uma sociedade minimamente sustentável requer esforços da sociedade com colaboração entre a ciência e os formuladores de políticas públicas. **Ciência e Cultura**, v. 74, n. 4, p. 01–14, 2022.

BAPTISTA, G. M. DE M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. **XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil**, p. 1037–1044, 2003.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. **Acordo de Paris**. Brasília: 2021.

Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. DE S. C. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31, 2013.

DOSSA, K. F.; MIASSI, Y. E. Remote Sensing Methods and GIS Approaches for Carbon Sequestration Measurement: A General Review. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, n. 7, p. 222–233, 2024.

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

GEOSENSOR. **Processamento de Imagens para Sequestro de Carbono**. YouTube, 9 de dezembro de 2021.

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Npe0cMs2BrY&t=4229s>. Acesso em: 10 de dezembro de 2021.

GEOTECNOLGIAS NAS REDES. **Cálculo de temperatura de superfície em Celsius usando QGIS 3.8**. Geotecnologias na rede. Data de publicação: 2019-08-07. Acesso em: 29 de outubro de 2024.

GOMES, D. DA S. et al. CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 1898–1908, 2021.

GOMES, M. P. Protocolo de Kyoto: origem. **Conjuntura Internacional**, n. 4, p. 1, 2005.

GRISCOM, B. W. et al. Carbon and biodiversity impacts of intensive versus extensive tropical forestry. **Conservation Letters**, Wiley-Blackwell, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2018.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Sinopse do Censo Demográfico de 2010**. Rio de Janeiro: 2011.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Cidades@**. Disponível em:

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ribeirao-preto/panorama>. Acesso em: 11 out. 2024.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team: H. Lee and J. Romero (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. 184 p. ISBN 978-92-9169-164-7. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da Bacia Hidrográfica do São José dos Dourados. **São Paulo: CBH-SJD**, 1999.

JATOI, W. N. et al. **Building climate resilience in agriculture**. Cham: Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-79408-8.

KOTCHETKOFF-HENRIQUES, O. **Caracterização da vegetação natural em Ribeirão Preto, SP: bases para conservação**. 2003. Tese (Doutorado em Biologia Comparada) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2003. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59139/tde-29042004-130918/publico/caract_veg.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

LIN, W. et al. Carbon savings resulting from the cooling effect of green areas: A case study in Beijing. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8–9, p. 2148–2154, 2011.

MONTÈS, N. et al. A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. **Forest Ecology and Management**, v. 130, n. 1–3, p. 37–46, 2000.

NAÇÕES UNIDAS. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998.

NOVA, R. A. V.; GONCALVES, R. M.; LIMA, F. V. M. S. Temporal analysis of heat islands through surface temperature and vegetation index in Recife-PE, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 598–614, 2021.

OLSON, K. R. et al. Experimental considerations, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 2, p. 348–360, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Envisaging the Future of Cities**. 2022.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 984–988, 2011.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R. **Serviços ambientais: conceitos, classificação, indicadores e aspectos correlatos**. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Ed.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 29-35.

RAHMAN, A. F. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop, JPL/NASA**, Pasadena, Califórnia, 2000.

REID, W. V. et al. **Ecosystems and human well-being: A report of the Millennium Ecosystem Assessment**. World Resources Institute. Island Press, Washington, DC, 2005.

RIBEIRÃO PRETO (MUNICÍPIO). **Percentual de urbanização do município de Ribeirão Preto, 2000 e 2010**. Disponível em: <https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/dps/percentual-de-urbanizacao>. Acesso em: 16 out. 2024a.

RIBEIRÃO PRETO (MUNICÍPIO). **Parque Municipal do Morro de São Bento**. Disponível em: <https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/principal/parque-municipal-do-morro-de-sao-bento>. Acesso em: 15 nov. 2024b.

ROLIM, G. DE S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Agrometeorologia**, v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.

ROWNTREE, R. A.; NOWAK, D. J. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide. **Arboriculture & Urban Forestry (AUF)**, v. 17, n. 10, p. 269-275, 1991.

SANTOS, C. V. B. DOS. **Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO₂ em áreas de caatinga preservada e em regeneração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2017. Disponível em: <http://localhost:8080/tede/handle/tede/623>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SÃO PAULO (ESTADO). **Guia de Áreas Protegidas**. Disponível em: <https://guiadeareasprotegidas.sp.gov.br/ap/area-de-protecao-ambiental-morro-de-sao-bento/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SÃO PAULO (ESTADO) - Instituto Florestal (IF). **Plano de manejo da Estação Ecológica de Ribeirão Preto**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, 2010. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/2012/01/EERP-Vol-principal.pdf>. 10 nov. 2024.

SHISHEGAR, N. The impacts of green areas on mitigating urban heat island effect: A review. **The International Journal of Environmental Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 119–130, 2014.

SMITH, P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 3, p. 229-236, 2004.

TADESE, S. et al. Above ground biomass estimation methods and challenges: A review. **Journal of Energy Technologies and Policy**, v. 9, n. 8, p. 12–25, 2019.

TRINDADE, A. R. et al. Mapeamento de remanescentes florestais em áreas urbanas: uso de dados espaciais para estimativa de índice de áreas verdes. **Revista GeoNordeste**, v. 1, p. 77–93, 2021.

USGS. **Landsat 8-9 Collection 2 Level 2 Science Product (Guide)**. United States Geological Survey: Asheville, NC, USA, p. 1-42, 2022. Disponível em: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v6.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

USP (Universidade de São Paulo). **Em Ribeirão Preto, USP transformou fazenda de café em área verde**. 2017. Disponível em: <https://jornal.usp.br/?p=79530>. Acesso em 12 nov. 2024.

VARANDA, M. E.; OLIVEIRA, C. DE; BAROSELA, J. R. Restauração de processos ecológicos no Projeto Floresta da USP-RP: um projeto coletivo. **VII Congresso de Ecologia do Brasil, Caxambu - MG**, 2005. Disponível em: <https://www.seb-ecologia.org.br/revistas/indexar/anais/viaceb/resumos/374a.pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Ministério da Economia, Fazenda e Planejamento, Fundação IBGE, 1991.

WATSON, Robert T. et al. **Climate Change 2001: Synthesis Report**: A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team: R.T. Watson, D.L. Albritton et al. Cambridge: [s.n.], 2001. x, 397 p. ISBN 0521807700 (hbk.), 0521015073 (pbk.). Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/466959?v=pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

WESTMAN, W. E. How much are nature's services worth? Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating. **Science**, v. 197, n. 4307, p. 960-964, 1977.

ZHANG, P. et al. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation dynamics indicated by NDVI in a large dam-reservoir-river system. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120477, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120477.

ZHANG, Y.; SHAO, Z. Assessing of urban vegetation biomass in combination with LiDAR and high-resolution remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 3, p. 964–985, 2021.

ZHAO, D. et al. Carbon sinks in urban public green spaces under carbon neutrality: A bibliometric analysis and systematic literature review. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 86, p. 128037, nov. 2023. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128037.