

Estimativa do índice CO₂flux por imagens de satélite Landsat 8 em Juiz de Fora/MG: cenas dos anos 2017 e 2022

RESUMO

Pedro Ferreira Lage

pedroferreiralage@gmail.com

orcid.org/0009-0005-3173-7392

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Sandro Henriques de Faria

sandro.faria@ifsudestemg.edu.br

orcid.org/0000-0002-1046-6467

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Com os impactos ambientais decorrentes das intervenções humanas, as imagens de Sensoriamento Remoto auxiliam na avaliação de índices de vegetação e, consequentemente, na estimativa de fluxo de dióxido de carbono (CO₂) para cenas de diferentes anos, que pode sinalizar para eventuais alterações no uso e ocupação do solo de uma região, contribuindo para nortear os agentes responsáveis e aumentar os benefícios à saúde da população. Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo verificar a possível existência de diferenças do índice CO₂flux para cenas de agosto de 2017 e junho de 2022 do satélite Landsat 8, em área do município de Juiz de Fora/MG. Utilizando-se o plugin Semi-Automatic Classification, versão 5.3.6.1 do SIG gratuito QGIS, realizou-se a correção atmosférica das imagens de satélite. Posteriormente, estimou-se os índices de vegetação NDVI, PRI e sPRI, e, calculou-se o CO₂flux, desenvolvendo-se o plugin CO₂ FLUX para automatizar o cálculo dos índices supracitados no SIG QGIS. Em seguida, analisou-se estatisticamente os dados de CO₂flux por meio do Teste t de Student para amostras pareadas, a 5% de significância. Obteve-se p-valor igual à 0,28, demonstrando que, para os dados das cenas de 2017 e 2022, não houve diferença estatística entre os modelos de CO₂flux.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto. Sistemas de Informações Geográficas – SIG. Análise espacial. Efeito Estufa.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional modificou a utilização do espaço urbano. Com os impactos ambientais decorrentes das intervenções humanas e ocupações irregulares, o uso do solo é objeto constante de estudo para tomadas de decisão ao longo do desenvolvimento das cidades (SILVA, 2020; SANTOS *et al.*, 2023).

Nesse contexto, as ferramentas de Sensoriamento Remoto auxiliam na redução de custos de deslocamento, trabalhos de campo e tempo no monitoramento do espaço, possibilitando, por exemplo, análises mais precisas de áreas de difícil acesso, bem como interpretações mais assertivas de feições naturais (BACALHAU *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2021).

Destaca-se a relevância de se adquirir imagens de satélite com pouca nebulosidade, para que estas sejam mais claras quanto possível, haja vista que sombras e nuvens provocam a oclusão de feições, reduzindo a área útil da imagem (SILVA; LIPORACE, 2016). Para tal, escolher cenas em períodos de estiagem mostra-se uma escolha assertiva para o registro de menor quantidade de nuvens nas áreas em que se deseja analisar (ROCHA, 2018; SANTOS *et al.*, 2023).

Nessa conjuntura, a utilização de imagens de Sensoriamento Remoto, mostra-se essencial nos estudos e levantamentos ambientais, podendo contribuir para subsidiar os órgãos responsáveis em uma gestão ambientalmente adequada. Mas *et al.* (2018), ao analisarem a disponibilidade de imagens Landsat e Sentinel-2 para o Brasil, destacaram, que apesar da resolução espacial de até 60 metros dependendo da banda, a constelação de satélites Sentinel-2, direcionada ao monitoramento de vegetação e solos (EMBRAPA, 2020), tornou-se totalmente operacional apenas em 2018, sendo este o primeiro ano com dados completos para o território brasileiro (MAS *et al.*, 2018).

Nessas circunstâncias, a série americana Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) se destaca pela qualidade espaço-temporal de seus produtos, disponibilizados gratuitamente pela *United States Geological Survey* (USGS), bem como pelo acervo histórico de dados de pesquisas de recursos naturais e contínua atualização de suas tecnologias (MIRANDA *et al.*, 2019; USGS, 2023a).

A série de satélites Landsat teve início na década de 1960, culminando, em 2013, com o lançamento do Landsat 8, que opera em órbita circular, com resolução temporal de 16 dias. O sensor OLI (*Operational Land Imager*) coleta informações no visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas (resolução espacial 30 m) e banda pancromática (resolução espacial 15 m), enquanto para o sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) – que apresenta bandas espectrais no infravermelho termal – a resolução é de 100 metros (EMBRAPA, 2023; USGS, 2023b).

Ressalta-se a importância de se realizar a correção pelo pixel escuro das imagens do produto nível 1 da coleção 1, que apresentam radiância no nível do sensor expressa em números digitais (ND), adquiridas do Landsat 8, haja vista que se consegue reduzir a interferência atmosférica, decorrente especialmente da presença de nuvens, e representar, de forma mais acurada, os elementos imageados, com a aplicação, por exemplo, do método da Subtração do Objeto Escuro, *Dark Object Subtraction* – DOS – (CHAVEZ, 1988), optando-se pela técnica DOS1 (CONGEDO, 2021; MARTINS; GASS; SILVA, 2018; SANCHES *et al.*, 2011). Por ser considerado de correção simples e com possibilidades de ser aplicado para

diferentes sensores (SANCHES *et al.*, 2011), o método DOS1 baseia-se em se assumir uma alta probabilidade de as imagens apresentarem DN baixos, equivalente a 1% de reflectância. Desse modo, é escolhido um valor de pixel escuro e realizada a subtração dos valores estimados para toda imagem, considerando um espalhamento uniforme na cena (CONGEDO, 2021; SANCHES *et al.*, 2011; USGS, 2023c), podendo-se automatizar todo o processo através, por exemplo, do plugin *Semi-Automatic Classification – SCP* (CONGEDO, 2021) do SIG gratuito de código aberto QGIS 3.34 (QGIS, 2024), *software* que tem em vista permitir e popularizar a utilização dos códigos geoespaciais para a comunidade (GARCIA, 2020; QGIS, 2024).

Nesse cenário, como as atividades antrópicas têm impacto direto na emissão de gases de efeito estufa (GEE), o SR contribui na avaliação de índices de vegetação e, conseqüentemente, na estimativa de fluxo de dióxido de carbono (CO₂), que é o mais representativo dentre os GEE (CORREIA FILHO *et al.*, 2021; MARANI *et al.*, 2020; ROSSI *et al.*, 2022; SILVA; BAPTISTA, 2015).

A emissão de GEE contribui para a intensificação do efeito estufa, estando relacionada a doenças respiratórias e cardiovasculares na população, em especial em crianças e idosos (LEITE *et al.*, 2020). Como preconizado pela Lei nº 14.850/2024, o monitoramento atmosférico é um instrumento primordial para uma gestão ambientalmente adequada da qualidade do ar em todo o território nacional (BRASIL, 2024b). Ademais, os efeitos da liberação de CO₂ para a atmosfera, considerada uma das principais causas do aquecimento global, são atenuados pela presença de áreas verdes, beneficiando o microclima de uma região (CORREIA FILHO *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2020; SELMI *et al.*, 2016; SOUZA, 2019). Nesse sentido, é de suma importância a presença de vegetação em área urbana, visando aumentar o processo de fotossíntese, que é responsável por captar GEE e partículas finas causadoras de asma e bronquite (PEREIRA *et al.*, 2020; SELMI *et al.*, 2016).

A utilização do SR permite a estimativa dos principais índices de vegetação que auxiliam no processamento, análise e monitoramento de dados ambientais, com destaque para o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que é adimensional e indica o estado e a quantidade de vegetação. Valores de NDVI entre -1 e 0 sinalizam para a presença de água e nuvens, enquanto NDVI entre 0 e 1 indicam superfícies com alguma vegetação (FRANCISCON *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2021).

Analogamente, o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), que indica o uso eficiente da luz durante a fotossíntese, também é adimensional e varia de -1 a 1, com áreas de vegetação sadia apresentando, comumente, valores de PRI entre -0,2 a 0,2 (ALMEIDA; ROCHA, 2021; GOMES *et al.*, 2021).

Dessa forma, relacionando-se o vigor vegetativo expresso pelo NDVI com o sPRI, que é o índice PRI reescalado para valores positivos e é sensível às mudanças nos pigmentos carotenóides na folhagem, consegue-se estimar o fluxo de CO₂ pelo Índice de Sequestro Florestal de Carbono – CO₂flux – (ALMEIDA; ROCHA, 2021; GOMES *et al.*, 2021; RAHMAN *et al.*, 2000), que é adimensional e avalia a eficiência, pelas plantas, no processo de sequestro de carbono (ROSSI *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2023).

Diferentes autores têm utilizado as ferramentas de SR para estimativa dos variados índices de vegetação, tanto no que tange a comparação das imagens de

satélites com resultados de campo (RESENDE, 2018; SANTOS *et al.*, 2023; SILVA; BAPTISTA, 2015; TEOBALDO; BAPTISTA, 2016), quanto na busca por inferências e conclusões para uma gestão ambientalmente adequada do uso da terra (ALMEIDA; ROCHA, 2021; CORREIA FILHO *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2021; FOLHARINI; OLIVEIRA, 2017; FRANCISCON *et al.*, 2017; MARTINS; GASS; SILVA, 2018; ROSSI *et al.*, 2022).

A avaliação do fluxo de CO₂ para cenas de diferentes anos sinaliza para eventuais alterações no uso e ocupação do solo de uma região, permitindo-se associar a influência humana à capacidade de remoção de CO₂. Desse modo, analisar cenas com intervalos de pelo menos cinco anos, como realizado por Almeida e Rocha (2021), Balieiro e Veloso (2022), Correia Filho *et al.* (2021) e Marani *et al.* (2020), pode contribuir para nortear os agentes responsáveis que visam melhorar o espaço urbano e, conseqüentemente, aumentar os benefícios diretos e indiretos à saúde e à qualidade de vida da população (MARANI *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2023; SOUZA, 2019).

Para tais avaliações, a análise estatística apresenta-se como uma ferramenta de extrema relevância para a comparação de dados estimados com valores reportados em campo, bem como para dados provenientes de imagens de satélite em diferentes momentos de uma escala espaço-temporal, que pode ter seu estudo ampliado e otimizado em virtude dos recursos proporcionados pelo SR. Nesse sentido, Silva e Baptista (2015), por exemplo, compararam estatisticamente, pelos coeficientes de Pearson, Spearman e pela correlação canônica, o fluxo de dióxido de carbono, a partir das torres de medições micrometeorológicas instaladas na Amazônia brasileira, com o índice CO₂flux de imagens de satélite, enquanto Gomes *et al.* (2021) e Oliveira *et al.* (2017) verificaram, também estatisticamente, a possível influência da sazonalidade no sequestro de carbono e na temperatura de superfície em áreas do bioma da Caatinga pelo coeficiente de Spearman, e nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília pelo Coeficiente de Kendall, respectivamente.

Nesse contexto, o município de Juiz de Fora, quarto mais populoso do estado de Minas Gerais, com 540.756 habitantes (IBGE, 2022) e localizado na Zona da Mata mineira, é um pólo estadual, destacando-se pelo setor industrial diversificado e pela excelência na área de ensino básico e superior. Inserido em área de Mata Atlântica, cujos trechos remanescentes são poucos e encontram-se consideravelmente degradados, o município de Juiz de Fora – cujas cenas do Landsat 8 são de órbita/ponto 217/075 (USGS, 2023a) – apresenta clima com duas estações bem definidas: uma quente e chuvosa e outra mais fria e seca (PIMENTEL, 2021; RIBEIRO, 2012).

No cenário municipal, a Lei nº 13.206/2015 (JUIZ DE FORA, 2015), que dispõe sobre a Política de Arborização Urbana de Juiz de Fora, e a Lei nº 14.556/2023 (JUIZ DE FORA, 2023), que estabelece o estado de emergência climática no município, corroboram a relevância de se monitorar e avaliar a poluição atmosférica por dióxido de carbono, visando-se contribuir para uma melhoria da qualidade de vida da população da cidade, que, além de referência para o estado de Minas Gerais, encontra-se muito próxima ao limite de diferentes municípios do estado fluminense (PIMENTEL, 2021; RIBEIRO, 2012).

Ademais, a frota de veículos em Juiz de Fora ultrapassou, em 2023, a marca de 300.000 (BRASIL, 2024a), enaltecendo a relevância que o controle da emissão

de dióxido de carbono, tanto por fontes fixas quanto por móveis, exige na busca pela melhoria da saúde da população, conforme também preconizado pela Resolução nº 490/2018, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2018), que estabelece exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE.

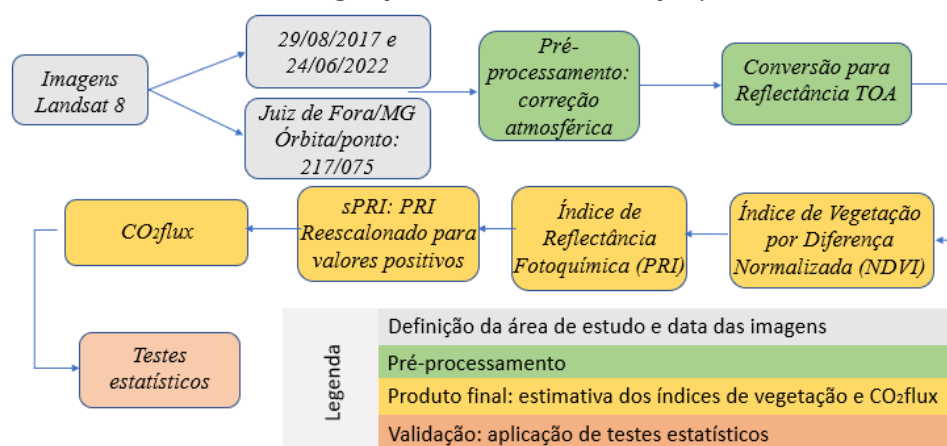
Nessa conjuntura, foi aprovado pela Câmara dos Deputados, nos meses finais de 2023, o projeto de Lei nº 2.148/2015 (BRASIL, 2015), que regulamenta o mercado de carbono no Brasil e cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa, visando estabelecer tetos para emissões de GEE e, consequentemente, vantagens competitivas para empresas que reduzem impactos e contribuem com o meio ambiente (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2023).

Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo verificar a possível existência de diferenças do índice CO₂flux para cenas de agosto de 2017 e junho de 2022 do satélite Landsat 8, em área do município de Juiz de Fora/MG.

MÉTODOS

O procedimento metodológico do presente estudo está sintetizado no fluxograma da Figura 1. As imagens Landsat 8 OLI obtidas, de órbita/ponto 217/075, datam de 29 de agosto de 2017 e 24 de junho de 2022, ambas sem registro de pluviosidade (INMET, 2024), em virtude de apresentarem valores inferiores à 7% de cobertura de nuvens (USGS, 2023a).

Figura 1 – Fluxograma metodológico: aquisição de imagens, pré-processamento, estimativa dos índices de vegetação e do CO₂flux, e validação por testes estatísticos



Fonte: Autoria própria (2024).

Utilizando-se o plugin *Semi-Automatic Classification* (SCP), versão 5.3.6.1 (CONGEDO, 2021) do SIG QGIS 3.34 (QGIS, 2024), foi realizada a correção atmosférica DOS1 em cada imagem, visando-se a obtenção da resposta espectral dos alvos sem a interferência atmosférica, e encontrando-se, assim, a reflectância no topo da atmosfera (TOA) através das Equações 1, 2, 3 e 4 (ALVES *et al.*, 2017; CONGEDO, 2021; SANCHES *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2023; USGS 2023c).

$$\rho_p = (\pi * L_\lambda * d^2) / (ESUN_\lambda * \cos\theta_s) \quad (1)$$

onde:

- ρ_p = reflectância no topo da atmosfera;
- d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas (fornecido no arquivo metadados das imagens do Landsat 8);
- L_λ = radiância espectral na abertura do sensor (radiância no satélite), calculada por:

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

onde:

- M_L = fator multiplicativo de redimensionamento específico de cada banda dos metadados do Landsat;
- Q_{cal} = valores de pixel padrão quantizados e calibrados (DN);
- A_L = fator aditivo de redimensionamento específico de cada banda dos metadados do Landsat.
- $ESUN_\lambda$ = irradiância solar exo-atmosférica média, em $W / (m^2 * \mu m)$, calculada por:

$$ESUN_\lambda = (\pi * d^2) * rad_{max} / ref_{max} \quad (3)$$

onde:

- rad_{max} e ref_{max} = radiância e a reflectância máximas, respectivamente, fornecidas no arquivo metadados das imagens.
- Θ_s = ângulo solar zenital em graus, calculado por:

$$\theta_s = 90^\circ - \theta_e \quad (4)$$

onde:

- Θ_e = ângulo de elevação solar em graus.

Nesse contexto, foi desenvolvido o plugin CO2 FLUX, que estará disponível no repositório do SIG QGIS (QGIS, 2024), para cálculo dos índices destacados nas etapas em amarelo do fluxograma metodológico da Figura 1. Estima-se, portanto, de posse da reflectância das bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo), o NDVI através da equação 5 (ALLEN *et al.*, 2002; ALMEIDA; ROCHA, 2021; GOMES *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023; SILVA; BAPTISTA, 2015).

$$NDVI = (\rho_{inf} - \rho_{ver}) / (\rho_{inf} + \rho_{ver}) \quad (5)$$

onde:

- NDVI = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada;
- ρ_{inf} = Reflectância da banda 5 (infravermelho próximo);
- ρ_{ver} = Reflectância da banda 4 (vermelho).

Em seguida, calcula-se, através da equação 6, o PRI utilizando-se as reflectâncias das bandas 2 (azul) e 3 (verde). Posteriormente, reescala-se o PRI para valores positivos, encontrando-se o sPRI pela equação 7. Subsequentemente,

calcula-se, pela equação 8, o índice CO₂flux (ALMEIDA; ROCHA, 2021; GOMES *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023; SILVA; BAPTISTA, 2015).

$$PRI = (\rho_{\text{verde}} - \rho_{\text{azul}}) / (\rho_{\text{verde}} + \rho_{\text{azul}}) \quad (6)$$

onde:

- PRI = Índice de Reflectância Fotoquímica;
- ρ_{verde} = Reflectância da banda 3 (verde);
- ρ_{azul} = Reflectância da banda 2 (azul).

$$sPRI = (PRI + 1) / 2 \quad (7)$$

onde:

- PRI = Índice de Reflectância Fotoquímica.

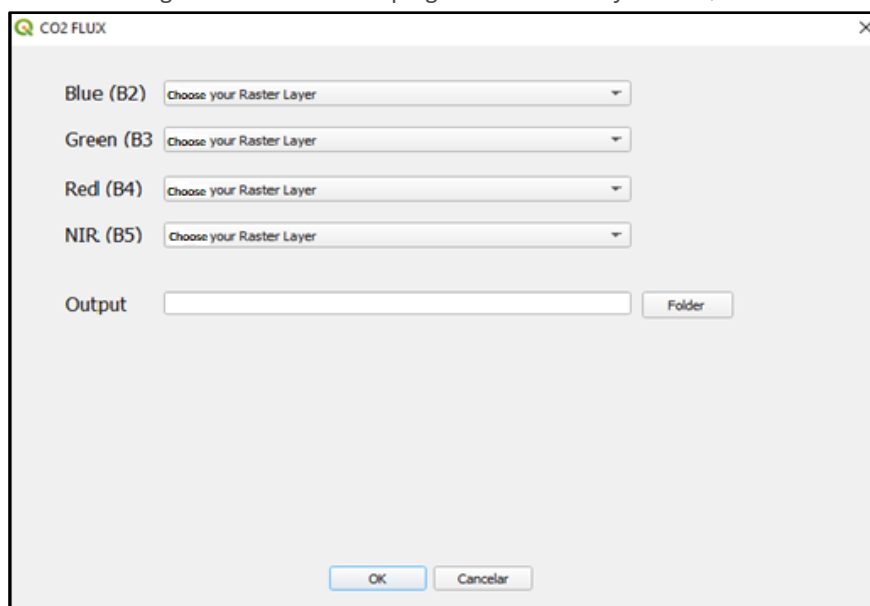
$$CO_2\text{flux} = NDVI * sPRI \quad (8)$$

onde:

- CO₂flux = Índice de Sequestro Florestal de Carbono;
- NDVI = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada;
- sPRI = Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) reescalado para valores positivos.

Nesse sentido, no plugin desenvolvido CO₂ FLUX, que automatiza as estimativas dos índices de vegetação e do CO₂flux (relativo ao calculado nas equações 5, 6, 7 e 8), o usuário deve apenas inserir os arquivos com as imagens já corrigidas das bandas 2 (azul), 3 (verde), 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo), e será retornado, como arquivo de saída, o índice CO₂flux calculado. A interface do plugin está apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Interface do plugin CO₂ FLUX – Software QGIS



Fonte: Autoria própria (2024).

De posse dos valores de CO₂flux para as cenas de 2017 e 2022 recortados para o município de Juiz de Fora/MG, pretendeu-se avaliar a existência de diferenças estatísticas entre as imagens. Para tal, calculou-se, primeiramente, o tamanho da amostra de pixels que terão os valores de CO₂flux avaliados. Utilizando-se a calculadora amostral desenvolvida pela equipe da Universidade de São Paulo – USP (LAURIS, 2024) e adotando-se o desvio padrão do CO₂flux de 0,021 (GOMES *et al.*, 2021), a diferença mínima a ser detectada de 0,015, valor menor que o desvio padrão, com base na equação 9 sugerida por VET *et al.* (2006), o nível de significância (α) de 5%, e o poder do estudo de 80% ($\beta=20\%$) (FARIA *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023; SILVA; BAPTISTA, 2015; VET *et al.*, 2006), encontrou-se o tamanho amostral de 32.

$$DDM = 1,96 * \sqrt{2} * EPM \quad (9)$$

onde:

- DDM = Diferença Mínima Detectável;
- EPM = Erro Padrão de Medida.

Em seguida, através das ferramentas do SIG QGIS 3.34 (QGIS, 2024), foi criado um vetor de pontos aleatórios na extensão do município de Juiz de Fora/MG, os quais tiveram os valores de CO₂flux para 2017 e 2022 registrados. Os dados foram migrados para o *software* Excel® 2016, no qual foram realizados os testes estatísticos, etapa destacada em vermelho no fluxograma metodológico da Figura 1.

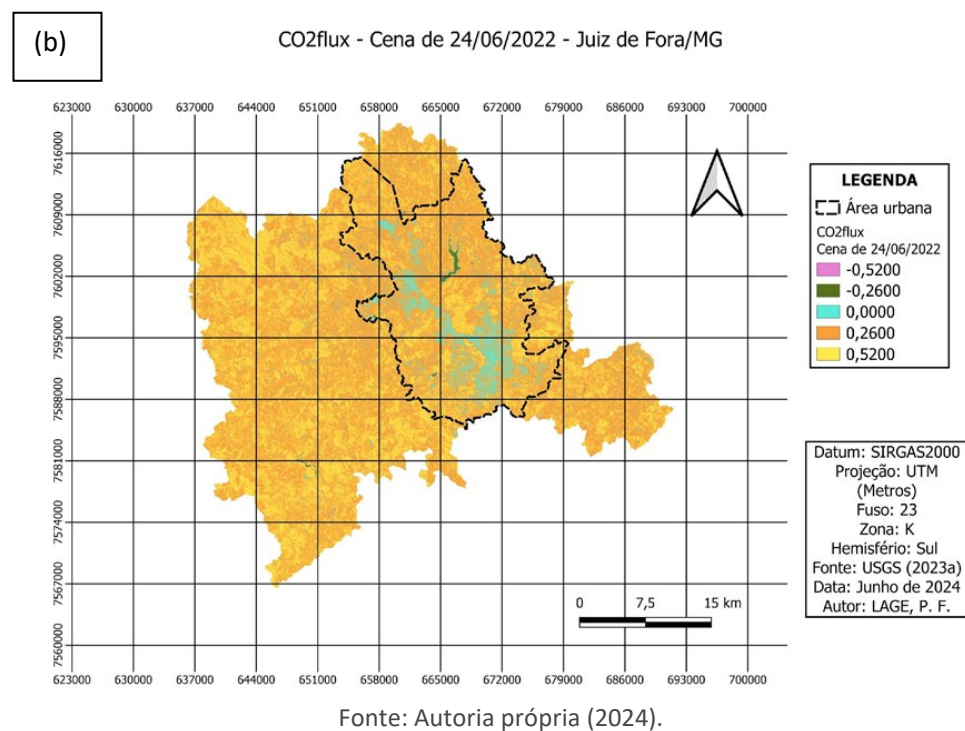
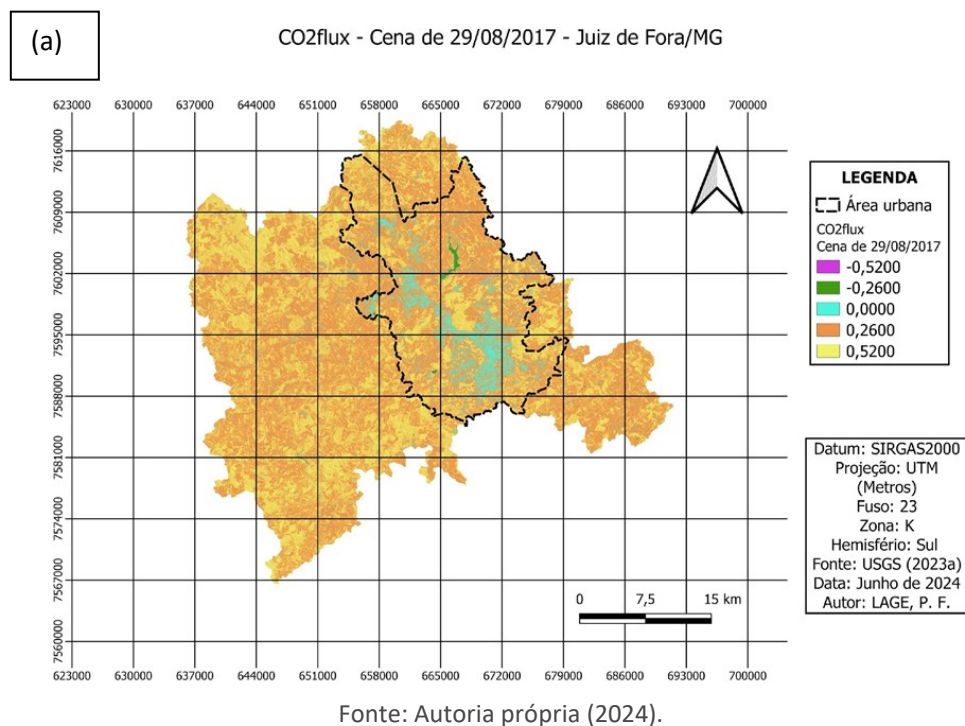
Primeiramente, foi gerado o *box-plot* das amostras de 2017 e 2022 para verificar a possível presença de *outliers*. Em seguida, realizou-se a diferença entre os valores registrados de 2022 e 2017, e fez-se o Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk (GOMES *et al.*, 2021; SILVA; BAPTISTA, 2015), para verificar a normalidade das duas amostras dependentes. Como p-valor, à 5% de significância, resultou em 0,66 (maior que 0,05) para a diferença entre as amostras de 2017 e 2022, houve aderência à distribuição normal.

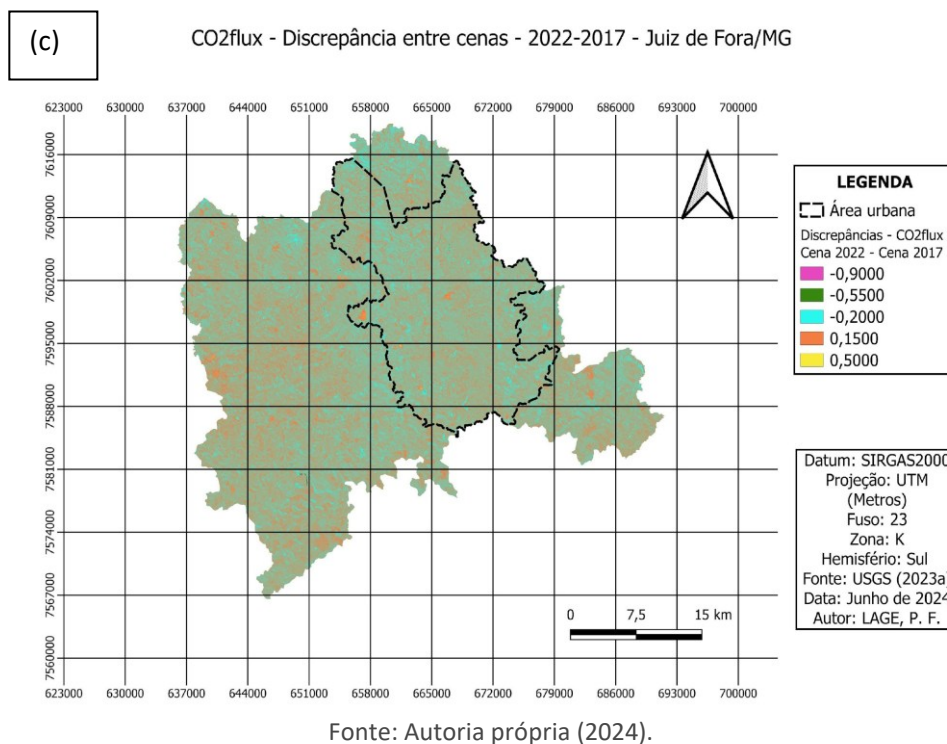
Como os pressupostos de normalidade e ausência de outliers foram obedecidos, realizou-se o Teste t de Student para amostras pareadas. Adotou-se a hipótese nula (p-valor maior que 0,05) como as amostras apresentando médias iguais, e a hipótese alternativa (p-valor menor ou igual à 0,05) como as médias amostrais diferindo-se significativamente entre si, a 95% de confiança (MACHADO *et al.*, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do índice CO₂flux para Juiz de Fora/MG nas cenas de estudo de 2017 e 2022 está apresentado na Figura 3 (a) e (b), respectivamente. Destaca-se que são os mesmos valores calculados pelo plugin CO₂ FLUX. A Figura 3 (c), por sua vez, expõe as discrepâncias entre as cenas, calculada pela subtração da cena de 2022 pela de 2017.

Figura 3 – Índice CO₂flux – Cenas de 2017 (a), 2022 (b) e suas discrepâncias (c) – Juiz de Fora/MG





Destaca-se, na área de Juiz de Fora/MG, que as porções mais afastadas da faixa urbanizada do município apresentam mais remanescentes de vegetação nativa e fragmentos de florestas, obtendo, assim, maiores valores de CO₂flux, representada pela coloração amarelada na Figura 3 (a) e esverdeada na Figura 3 (b), haja vista a maior presença de áreas fotossinteticamente ativas. Tais observações também foram indicadas por Teobaldo e Baptista (2016) ao quantificarem a perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal, e por Rossi *et al.* (2022) ao avaliarem a relação do fluxo de CO₂ com a sazonalidade das variáveis climáticas para a área do estado de Mato Grosso.

Nesse sentido, como destacado por Folharini e Oliveira (2017) ao calcularem o índice CO₂flux para áreas declivosas do município de Cubatão/SP, os valores mais baixos de CO₂flux sinalizam para uma diversidade da cobertura vegetal, absorvendo, portanto, menos CO₂ de acordo com o porte, indicando uma menor concentração de biomassa.

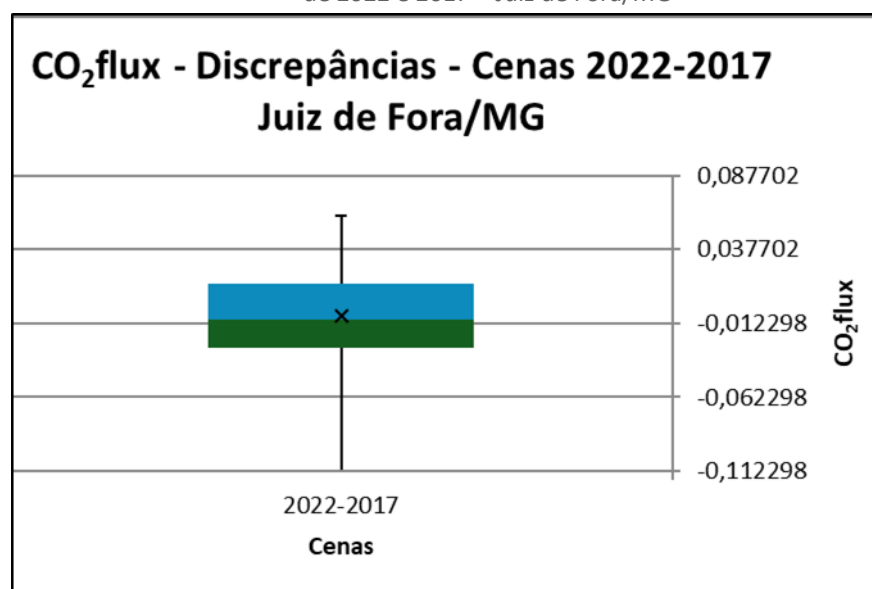
Nesse contexto, de acordo com o tamanho amostral calculado (LAURIS, 2024), foram demarcados, pelas ferramentas do SIG QGIS 3.34 (QGIS, 2024), 32 pontos aleatórios no município de Juiz de Fora/MG, que tiveram os valores de CO₂flux registrados para análise estatística e avaliação de possíveis diferenças estatísticas entre as cenas de 2022 e 2017 (FARIA *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023; SILVA; BAPTISTA, 2015).

Desse modo, foi gerado, primeiramente, o box-plot das discrepâncias entre as cenas em estudo (Figura 4) e verificou-se a ausência de outliers. Destaca-se que o eixo vertical representa os valores originais da diferença do índice CO₂flux entre 2022 e 2017.

A partir da aderência à normalidade e da ausência de *outliers* (MACHADO *et al.*, 2009), realizou-se o Teste t de Student para amostras pareadas. O teste

apresentou p-valor igual à 0,28 (maior que 0,05), rejeitando-se a hipótese alternativa em favor da hipótese nula, ou seja, mostrando-se que não há diferença estatisticamente significativa do índice CO₂flux – que estima sequestro florestal de carbono – da cena do ano de 2017 para a do ano de 2022, à 5% de significância, com poder de estudo de 80%.

Figura 4 – Box-plot – Índice CO₂flux – Discrepâncias entre as cenas de 2022 e 2017 – Juiz de Fora/MG



Fonte: Autoria própria (2024).

Destaca-se, assim como reportado por Oliveira *et al.* (2017), que valores de CO₂flux próximos a zero relacionam-se à uma menor quantidade de árvores e a um fluxo irregular de urbanização, associados, de forma geral, à supressão vegetativa. Os autores, tal como Correia Filho *et al.* (2021), Gomes *et al.* (2021), Rossi *et al.* (2022) e Santos *et al.* (2023), sinalizaram para a possível influência da sazonalidade na estimativa do índice CO₂flux, além da possibilidade de aumento da escala espaço-temporal de análise, incluindo imagens de diferentes resoluções espaciais, visando-se contrastar, com mais exatidão, alterações no uso da terra com variações nos índices vegetativos estimados por ferramentas de SR.

Nesse contexto, corrobora-se a extrema importância da preservação dos remanescentes de vegetação, haja vista que, pelas atividades fotossintetizantes, aumenta-se a eficiência de sequestro de carbono e a liberação de oxigênio para a atmosfera (ALMEIDA; ROCHA, 2021; GOMES *et al.*, 2021; ROSSI *et al.*, 2022). Salienta-se, também, a relevância dos agentes responsáveis priorizarem o incentivo para um uso e ocupação do solo mais ordenado, algo que, via de regra, não ocorreu historicamente durante a formação das manchas urbanas no Brasil, e poderia contribuir para uma maior captação dos GEE e, consequentemente, para a redução da poluição e das temperaturas médias (CORREIA FILHO *et al.*, 2021; ROSSI *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2023).

CONCLUSÕES

O Sensoriamento Remoto corroborou-se, pela avaliação do sequestro de CO₂ pela vegetação, como uma ferramenta de análise espaço-temporal que pode contribuir para subsidiar os órgãos responsáveis em uma gestão ambientalmente adequada acerca de eventuais alterações no uso e ocupação do solo de uma região, direcionado, no presente estudo, para o município de Juiz de Fora/MG e, por conseguinte, suas autoridades, possibilitando-se melhorar o espaço urbano e, consequentemente, aumentar os benefícios diretos e indiretos à saúde e à qualidade de vida da população.

Não foram encontradas diferenças estatísticas à 5% de significância, com poder de estudo de 80%, do índice CO₂flux para cenas de 2017 e 2022 na área do município de Juiz de Fora/MG. Reforça-se, desse modo, a extrema relevância da manutenção de presenças vegetais, principalmente em regiões mais densamente urbanizadas, haja vista que remanescentes de vegetação alocam carbono no solo, fundamental no processo de fotossíntese e primordial para minimização dos efeitos do dióxido de carbono para o meio ambiente, em especial para o contingente populacional.

Como recomendações de estudos futuros, sugere-se o aumento do intervalo temporal para avaliar a existência de diferenças estatísticas significativas entre cenas, além da análise de efeitos da sazonalidade nos valores do índice CO₂flux, com possibilidades de se comparar as variáveis ambientais com o uso e ocupação do solo para a área de estudo, ponderando-se também acerca do enriquecimento da pesquisa com a utilização de imagens de diferentes resoluções espaciais.

Estimation of the CO₂ flux index using Landsat 8 satellite images in Juiz de Fora/MG: scenes from the years 2017 and 2022

ABSTRACT

With the environmental impacts resulting from human interventions, Remote Sensing tools assist in the evaluation of vegetation indices and, consequently, in the estimation of carbon dioxide (CO₂) flux for scenes from different years, which can signal possible changes in land use and occupation in a region, helping to guide responsible agents and increase health benefits for the population. In this context, the present study aims to verify the possible existence of differences in the CO₂ flux index for scenes from August 2017 and June 2022 from the Landsat 8 satellite, in an area of the municipality of Juiz de Fora/MG. Using the Semi-Automatic Classification plugin, version 5.3.6.1 of the free GIS QGIS, atmospheric correction of the satellite images was performed. Subsequently, the vegetation indices NDVI, PRI and sPRI were estimated, and the CO₂ flux was calculated, developing the CO₂ FLUX plugin to automate the calculation of the aforementioned indices in GIS QGIS. Then, the CO₂ flux data were statistically analyzed using the Student's t-test for paired samples, at 5% significance. A p-value equal to 0.28 was obtained, demonstrating that, for the data from the 2017 and 2022 scenes, there was no statistical difference between the CO₂ flux models.

KEYWORDS: Remote sensing. Geographic Information Systems – GIS. Spatial analysis. Greenhouse Effect.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; TASUMI M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). **Idaho implementation: advanced training and users manual**, version 1, p. 97, 2002. Disponível em: <https://posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2017/04/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2024.

ALMEIDA, J. R. da R.; ROCHA, K. da S. Caracterização da cobertura vegetal em área de proteção ambiental no sudoeste amazônico com dados de satélite. In: OLIVEIRA, R. J. de (org.). **Silvicultura e Manejo Florestal: técnicas de Utilização e Conservação da Natureza**, v. 2, cap. 3, p. 55-70, 2021. Editora Científica Digital. <https://dx.doi.org/10.37885/210303552>.

ALVES, L. E. R.; GOMES, H. F. B.; SANTOS, M. N. dos; FREITAS, I. G. F. de. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 33, p. 117-127, 2017. <https://dx.doi.org/10.11606/rdg.v33i0.124577>.

BACALHAU, J. R.; RIBEIRO NETO, A.; OLIVEIRA, L. M. M. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 283–293, 2017. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1449.283-293>.

BALIEIRO, B. T. S.; VELOSO, G. A. Análise multitemporal da cobertura do solo da Terra Indígena Ituna-Itatá através da classificação supervisionada de imagens de satélites. **Revista Cerrados**, [S. l.], v. 20, n. 02, p. 261–282, 2022. DOI: 10.46551/rc24482692202227. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/5076>. Acesso em: 29 jul. 2025.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 2.148/2015**: Estabelece redução de tributos para produtos adequados à economia verde de baixo carbono; institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976, 11.033, de 21 de dezembro de 2004, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2015. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=1548579>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018**. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras

providências. Brasília, DF. 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767. Acesso em: 27 jun. 2024.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **SENATRAN**: frota de Veículos 2023. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>. Acesso em: 24 jun. 2024.

BRASIL. Lei n. 14.850, de 02 de maio de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar. **Diário Oficial da União**: seção 1. Brasília, DF. 02 maio 2024b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14850.htm. Acesso em: 06 maio 2024.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil**, Meio Ambiente e Energia, 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1029046-CAMARA-APROVA-PROJETO-QUE-REGULAMENTA-O-MERCADO-DE-CARBONO-NO-BRASIL>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 459-479, abr. 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3).

CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin: a python tool for the download and processing of remote sensing images in qgis. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 64, p. 3172, 2021. <http://dx.doi.org/10.21105/joss.03172>.

CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. de B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; SILVA JÚNIOR, C. A. da; OLIVEIRA, S. R. da S.; SILVA, E. B. da; TEODORO, P. E. Analysis of environmental degradation in Maceió-Alagoas, Brazil via orbital sensors: a proposal for landscape intervention based on urban afforestation. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 24, p. 100621, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100621>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária. **Sentinel**: Missão Sentinel. Satélites de monitoramento, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>. Acesso em: 30 jul. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária. **LANDSAT**: Land Remote Sensing Satellite. Satélites de monitoramento, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 07 jan. 2023.

FARIA, S. H. de; RODRIGUES, D. D.; MEDEIROS, N. das G.; ARANHA, P. R. A. Avaliação de radargramas batimétricos para cálculo de volume de represa empregando o classificador “FCLASS2”. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 2, p. 234-251, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702017000200015>.

FOLHARINI, S. O.; OLIVEIRA, R. C. de. Cálculo do Índice Espectral CO2FLUX em área de mata atlântica e sua relação com processos gravitacionais no município de Cubatão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17. 28 de junho a 02 de julho de 2017, Campinas. **Anais [...]** Campinas: Instituto de Geociências Aplicadas UNICAMP, 2017. <http://dx.doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2175>.

FRANCISCO, U.; CUNHA, J. M. da; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P. da; LEMOS, N. S. A.; BRITO FILHO, E. G. de; BRITO, W. B. M. Estimativas de Índices de Vegetação na Microbacia do Rio Puruzinho, Sul do Amazonas. **Caderno de Geografia**, v. 31, n. 65, p. 457, 2021. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2021v31n65p457>.

GARCIA, E. A. B. y. **Estimativa do fluxo de CO2 na camada limite da atmosfera sobre a RDS Uatumã/AM-Brasil por meio de imagens orbitais e dados micrometeorológicos**. 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.643>.

GOMES, D. da S.; SANTOS, S. K. dos; SILVA, J. H. C. S.; SANTOS, T. de M.; SILVA, E. de V.; BARBOSA, A. da S. CO2flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 1898-1908, 2021. <http://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1898-1908>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama**, 2022. Juiz de Fora. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>. Acesso em: 21 fev. 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Tempo**: Tabela de Dados das Estações. 2024. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

JUIZ DE FORA. Prefeitura de Juiz de Fora. Sistema de Legislação Municipal. Lei nº 13.206, de 25 de setembro de 2015. Dispõe sobre a Política Municipal de Arborização Urbana de Juiz de Fora. **Diário Oficial Eletrônico**. Juiz de Fora, MG. 25 set. 2015. Disponível em: <https://jflgis.pjf.mg.gov.br/norma.php?chave=0000038989>. Acesso em: 28 abr. 2024.

JUIZ DE FORA. Prefeitura de Juiz de Fora. Sistema de Legislação Municipal. Lei nº 14.556, de 09 de janeiro de 2023. Estabelece o estado de emergência climática no Município de Juiz de Fora e dá outras providências: Projeto nº 243/2021, de autoria da Vereadora Tallia Sobral. **Diário Oficial Eletrônico**. Juiz de Fora, MG. 10 jan. 2023. Disponível em: https://www.pjf.mg.gov.br/e_atos/e_atos_vis.php?id=102590. Acesso em: 28 abr. 2024.

LAURIS, J. R. P. **Cálculo Amostral**: site de estatística. 2024. Disponível em: http://estatistica.bauru.usp.br/calculoamostral/ta_diferenca_media_independente.php. Acesso em: 27 mar. 2024.

LEITE, V. P.; DEBONE, D.; MIRAGLIA, S. G. El K. Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde. **Vittalle - Revista de Ciências da Saúde**, v. 32, n. 3, p. 143-153, 2020. <http://dx.doi.org/10.14295/vittalle.v32i3.12220>.

MACHADO, M. R.; MACHADO, M. A. V.; CORRAR, L. J. Desempenho do índice de sustentabilidade empresarial (ISE) da bolsa de valores de São Paulo. **Revista Universo Contábil**, v.5, n.2, p. 24-38, 2009. <http://dx.doi.org/10.4270/ruc.2009211>.

MARANI, L.; GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; DOMINGUES, L. G.; CORREIA, C. C. S.; GLOOR, M.; PETERS, W.; BASSO, L. S.; CRISPIM, S. P.; NEVES, R. A. L. Estimation Methods of Greenhouse Gases Fluxes and The Human Influence in the CO₂ Removal Capability of the Amazon Forest. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 5, p. 1129-1144, 2020. <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20200091>.

MARTINS, V. E.; GASS, S. L. B.; SILVA, D. M. da. Aplicação de técnicas de correção atmosférica em imagens de satélite para fins de mapeamento temporal de uso e cobertura do solo. In: BALDÃO, G. de M. **Gestão do Conhecimento, Tecnologia e Inovação**. Ponta Grossa: Atena, 2018, cap. 3, p. 33-41. <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.0701812124>.

MAS, J. F.; SOPCHAKI, C. H.; BRAZ RABELO, F. D.; ARAÚJO, F. S. de; SOLÓRZANO, J. V. Análise da disponibilidade de imagens Landsat e Sentinel para o Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [S. l.], v. 24, p. e47, 2020. DOI: 10.5902/2236499461324. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/61324>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MIRANDA, M. de P.; DUARTE, C. R.; GOMES, D. D. M.; SOUZA, C. D. de; SILVA NETO, C. A. Análise comparativa de imagens Sentinel-2A (MSI) e Landsat-8 (OLI) aplicadas ao mapeamento geológico, região de Itaitia, Santa Quitéria, CE. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 2, p. 366-377, 9 ago. 2019. Instituto de Geociências - UFRJ. Disponível em:

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64532/1/2019_art_mpmiranda.pdf.
Acesso em: 17 mar. 2024.

OLIVEIRA, M. T. de; GANEM, K. A.; BAPTISTA, G. M. de M. Análise sazonal da relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, 2017. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n4-44336>.

PEREIRA, B. da R.; MELLO, L.; REIS, D. F. dos; TAMBOR, J. H. M. Produção do etanol e sua mitigação de emissão de poluentes. In: Seminário Internacional de Integração Étnico-Racial, 8; **Revista ENIAC**, v. 8, n. 1, p. 13-21, 2020. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/issue/view/56. Acesso em: 16 mar. 2024.

PIMENTEL, T. Análise da distribuição espacial do sistema turístico de Juiz de Fora/MG. **Ateliê Geográfico**, v. 15, n. 2, p. 254-289, 2021. <http://doi.org/10.5216/ag.v15i2.66183>.

QGIS. Quantum GIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**, 2024. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html. Acesso em: 02 mar. 2024.

RAHMAN, A. de F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS EARTH SCIENCE AND APPLICATION WORKSHOP PRESENTATIONS. **Proceeding** [...] Pasadena, CA. February 23-25, 2000. Disponível em: https://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/00_docs/Rahman_web.pdf. Acesso em: 24 mar. 2024.

RIBEIRO, C. R. **Planejamento ambiental e gestão de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica da Represa de Chapéu D'Uvas – Zona da Mata e Campo das Vertentes/MG**. 2012. 520 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/e82f6e1f-5f8b-4ccc-8564-c71c4a67b365>. Acesso em: 16 mar. 2024.

ROCHA, L. R. **Modelagem para determinação do fluxo de CO₂ em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica a partir de dados do sensor MODIS**. 2018. 88 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/32918/1/2018_Lu%c3%adsaResendeRocha.pdf. Acesso em: 27 dez. 2023.

ROSSI, F. S.; SANTOS, G. A. de A.; MARIA, L. de S.; LOURENÇONI, T.; PELISSARI, T. D.; DELLA-SILVA, J. L.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. W.; SILVA, A. de A.; LIMA, M.; TEODORO, P. E. Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in central Brazil agricultural frontier from remote sensing data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 116, p. 103809, jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103809>.

SANCHES, I. D.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., **Anais [...]** Curitiba: INPE, 30 abr. a 05 maio. 2011. p. 7564-7571. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/32918/1/2018_Lu%c3%adsaResendeRocha.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

SANTOS, C. V. B. dos; BAPTISTA, G. M. de M.; MOURA, M. S. B. de; SILVA, A. de B.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; CARVALHO, H. F. S.; GALVÍNCIO, J. D. Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO₂ em áreas do Bioma Caatinga. **Journal of Environmental Analysis And Progress**, v. 8, n. 3, p. 226-239, 2023. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.8.3.2023.4724.226-239>.

SELMI, W.; WEBER, C.; RIVIÈRE, E.; BLOND, N.; MEHDI, L.; NOWAK, D. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 192-201, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.010>.

SILVA, M. A. O.; LIPORACE, F. S. Detecção automática de nuvem e sombra de nuvem em imagens de sensoriamento remoto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, p. 369-388, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000200021>.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. de M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 354-370, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702015000200020>.

SILVA, V. G. C. **Interferência do uso e ocupação do solo urbano na qualidade ambiental do Rio Sapato, Lauro de Freitas, Bahia**. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Planejamento Ambiental) - Universidade Católica de Salvador, Salvador. 2020. Disponível em: <http://ri.ucsal.br:8080/jspui/handle/prefix/1601&sa=D&source=docs&ust=1722341047089502&usg=AOvVaw1boSXMtKpcnz9VDOAyLvXb>. Acesso em: 24 mar. 2024.

SOUZA, R. C. de. **Fluxos de gases de efeito estufa (GEE) em florestas urbanas de São Paulo, SP: uma análise da contribuição das áreas verdes na resiliência da**

cidade. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://bibliotecatede.uninove.br/bitstream/tede/1995/2/Raquel%20Cristina%20de%20Souza.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2023.

TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. M. de M. Quantificação da Severidade das Queimadas e da Perda de Sequestro Florestal de Carbono em Unidades de Conservação do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 250–264, 2016. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p250-264>.

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**, 2023a. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 02 jan. 2023.

USGS. United States Geological Survey. **Landsat Missions**. 2023b. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>. Acesso em: 02 jan. 2023.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat level-1 data product**. 2023c. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>. Acesso em: 28 jan. 2023.

VET, H. C. W.; TERWEE, C. B.; KNOL, D. L.; BOUTER, L. M. When to use agreement versus reliability measures. **Journal of Clinical Epidemiology**, v. 59, n. 10, p. 1033–1039, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclinepi.2005.10.015>.

Recebido: 04 abr. 2025

Aprovado: 06 set. 2025

DOI: 10.3895/rbgeo.v13n2.19772

Como citar: LAGE, P. F.; FARIA, S. H.. Estimativa do índice CO₂flux por imagens de satélite Landsat 8 em Juiz de Fora/MG: cenas dos anos 2017 e 2022. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 194-213, jul./dez. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Pedro Ferreira Lage

Avenida Luiz Perry, 151, CEP 36015-380, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

