



Determinação da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos agrossistemas e cobertura vegetal do Cerrado Goiano

Determination of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation by agrosystems and vegetal cover in the Cerrado Goiano

Determinación de la fracción de radiación fotosintética activa absorbida por agrosistemas y cobertura vegetal en el Cerrado Goiano

Cleonice Batista Regis Soares

Universidade Federal de Jataí
cleoniceregis@gmail.com

Alécio Perini Martins

Universidade Federal de Jataí
alecioperini@ufj.edu.br

Resumo: O uso do índice biofísico de vegetação fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR), tornou-se uma variável essencial no monitoramento da produtividade das plantas e avaliação do balanço global de carbono. Assim, objetivou avaliar as variações do índice fAPAR nas formas de vegetação no município de Serranópolis utilizando a série temporal 2020-2021 de dados Sentinel-2. Para tanto, as informações de fAPAR foram produzidas utilizando imagens Sentinel-2 e o modelo RTM PROSAIL, processadas na plataforma SNAP *Toolbox*. Como resultados, a agricultura de grãos e a cana-de-açúcar apresentaram $R^2=0,903$ e $RMSE= 0,065$ e $R^2=0,847$ e $RMSE= 0,059$ respectivamente. A pastagem plantada em boas condições apresentou $R^2 = 0,889$ e $RMSE= 0,058$, a pastagem sombreada com $R^2 = 0,742$ e $RMSE = 0,064$ e a pastagem plantada de baixa qualidade e $R^2 = 0,856$ e $RMSE$

= 0,047. Para o Cerrado o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,5465$ e RMSE= 0,059. Para a formação florestal o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,6158$ e RMSE= 0,070.

Palavras-chave: Atividade fotossintética. Monitoramento ambiental. Absorção de CO₂. Serviço ambiental.

Abstract: The use of the vegetation biophysical index fraction of photosynthetically active radiation absorbed (fAPAR) has become an essential variable in monitoring plant productivity and evaluating the global carbon balance. Thus, the objective was to evaluate the variations in the fAPAR index in the forms of vegetation in the municipality of Serranópolis using the 2020-2021 time series of Sentinel-2 data. For this purpose, fAPAR information was produced using Sentinel-2 images and the RTM PROSAIL model, processed on the SNAP Toolbox platform. As results, grain agriculture and sugar cane presented $R^2=0.903$ and RMSE= 0.065 and $R^2=0.847$ and RMSE= 0.059 respectively. The pasture planted in good conditions presented $R^2 = 0.889$ and RMSE = 0.058, the shaded pasture with $R^2 = 0.742$ and RMSE = 0.064 and the pasture planted with low quality and $R^2 = 0.856$ and RMSE = 0.047. For the Cerrado, the coefficient of determination was $R^2 = 0.5465$ and RMSE = 0.059. For forest formation, the coefficient of determination was $R^2 = 0.6158$ and RMSE = 0.070.

Keywords: Photosynthetic activity. Environmental monitoring. CO₂ absorption. Environmental service.

Resumen: El uso del índice biofísico de la vegetación, fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR), se ha convertido en una variable esencial para monitorear la productividad de las plantas y evaluar el balance global de carbono. Así, el objetivo fue evaluar las variaciones del índice fAPAR en las formas de vegetación en el municipio de Serranópolis utilizando la serie temporal 2020-2021 de datos Sentinel-2. Para ello, se produjo información de fAPAR utilizando imágenes Sentinel-2 y el modelo RTM PROSAIL, procesados en la plataforma SNAP *Toolbox*. Como resultados, la agricultura de cereales y la caña de azúcar presentaron $R^2=0.903$ y RMSE= 0.065 y $R^2=0.847$ y RMSE= 0.059 respectivamente. El pasto sembrado en buenas condiciones presentó $R^2 = 0.889$ y RMSE = 0.058, el pasto bajo sombra con $R^2 = 0.742$ y RMSE = 0.064 y

el pasto sembrado con baja calidad y $R^2 = 0.856$ y $RMSE = 0.047$. Para el Cerrado el coeficiente de determinación fue $R^2 = 0,5465$ y $RMSE = 0,059$. Para la formación de bosques el coeficiente de determinación fue $R^2 = 0.6158$ y $RMSE = 0.070$.

Palabras clave: Actividad fotosintética. Monitoreo ambiental. Absorción de CO_2 . Servicio ambiental.

Introdução

O Brasil se comprometeu durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26), realizada em 2021, em Glasgow na Escócia, a reduzir de forma voluntária as Emissões de Gases Estufa (GEE) em 50 % até 2030, (MMA, 2021). Estudo realizado no Brasil afirma que as emissões estimadas de GEE em função das mudanças no uso do solo contribuem com 51% das emissões nacionais. Contudo, no período entre 1990 e 2015, as emissões brutas de GEE brasileiras passaram de 1,86 GtCO₂ eq para 1,92 GtCO₂ eq, representando um aumento de 3,5%. A partir de 2013, o crescimento das emissões de CO₂ foi motivado em função do aumento das taxas de desmatamento na Amazônia e pelo aumento do uso de combustíveis fósseis na matriz energética (ASSAD et al., 2019).

Nesse contexto, a vegetação do Cerrado constitui um importante sumidouro de carbono, mesmo no período de estiagem, mostrando-se um eficiente absorvedor de carbono atmosférico, indicando que sua preservação constitui em fator preponderante no processo de redução das emissões de CO₂ (dióxido de carbono) para a atmosfera (RODRIGUES, 2018). Por essa razão, a comunidade científica tem se preocupado com o desenvolvimento de pesquisas com foco na dinâmica das alterações de uso da terra e cobertura vegetal, buscando compreender o ciclo do carbono atmosférico.

Dentre os diferentes métodos de quantificação do carbono armazenado na vegetação, alguns se destacam, como a técnica da covariância de vórtices turbulentos ou torres de fluxos *Eddy Covariance* (EC) (FALGE et al., 2002). Contudo, o alto custo e operacionalização restringem seu uso, além da desvantagem relativa à capacidade de recobrimento da superfície territorial ser muito pequena.

Diante desse cenário, a utilização do sensoriamento remoto orbital apresenta vantagens em função da ampla área de cobertura, baixo custo operacional e à geração de grande volume de dados em curto intervalo de tempo. Ressalta-se também o uso predominante de técnicas que se fundamentam na teoria da eficiência de uso da luz, fração da radiação fotossinteticamente absorvida e a fração evaporativa utilizada na mensuração da água no processo de fixação do carbono pela vegetação (MONTEITH, 1972; FIELD et al., 1995; BASTIAANSEN; ALI, 2003).

Nesse sentido, os índices de vegetação vêm sendo muito utilizados nos protocolos de análises de diferentes variáveis biofísicas e bioquímicas, tais como Conteúdo de Clorofila, Índice de Área Foliar (IAF), Biomassa, Produtividade Primária Bruta (PPB) e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (fAPAR) (SANO et al., 2019).

O índice fAPAR caracteriza as trocas de energia entre o dossel e a atmosfera, sendo extensivamente utilizada em modelos que representam a transferência de energia, carbono, água e biogeoquímica de ecossistemas terrestres (SENNA et al., 2005). Constitui-se em relevante parâmetro enquanto indicador da fotossíntese e transpiração do dossel (SELLERS et al., 1997).

Assim sendo, a fAPAR apresenta uma relação direta com a eficiência de uso da radiação (EUR) pela vegetação como um importante bioindicador na relação da vegetação com a sazonalidade regional, seja por variabilidade climática e alterações climáticas (HUNT et al., 2004). A fAPAR consiste em uma variável biofísica essencial no monitoramento do crescimento da vegetação (JIN et al., 2022). Além ainda, de fazer parte do conjunto das 50 variáveis climáticas essenciais reconhecidas pelo Sistema de Observação do Clima Global das Nações Unidas (GCOS) (GOBRON; VERSTRAETE, 2009; VEGA-ARAVA; BARRANTES, 2019).

Estudos desenvolvidos por Dong et al. (2015), indicam que apenas a parte da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) absorvida pelos componentes fotossintéticos de um dossel, denominada fAPAR, está diretamente relacionado à fotossíntese e produção de biomassa. A fAPAR tem variação de valores de 0,0 a 1,0, sendo que 0,0 remete a áreas sem cobertura vegetal a 1,0 indicando áreas com vegetação em desenvolvimento ativo.

Nesse sentido, o índice fAPAR tornou-se um importante componente metodológico para fornecer informações que reportam o *status* da vegetação no contexto da variabilidade da atividade fotossintética e na mensuração de indicadores agroambientais, como o serviço ambiental na captura de CO₂ atmosférico pela vegetação. Desta forma, o trabalho objetivou determinar as variações do índice fAPAR nas formas de vegetação no município de Serranópolis - GO utilizando a série temporal de dados Sentinel-2 no período de 2020-2021.

Área de Estudo

A área de pesquisa compreende o município de Serranópolis, localizado na Microrregião Geográfica Sudoeste de Goiás, inserido no retângulo geográfico de $17^{\circ}40'00''S$ a $18^{\circ}40'00''S$ e $51^{\circ}30'00''W$ a $52^{\circ}50'00''W$ de Greenwich. Possui dimensão territorial de 5.526,723 km² e população estimada de 8.201 habitantes para 2024 (IBGE, 2024) (Figura 1).

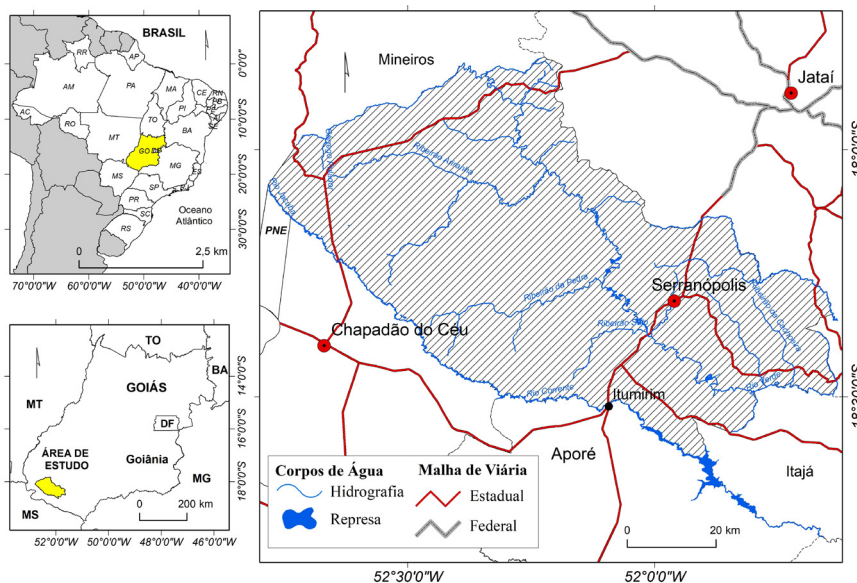
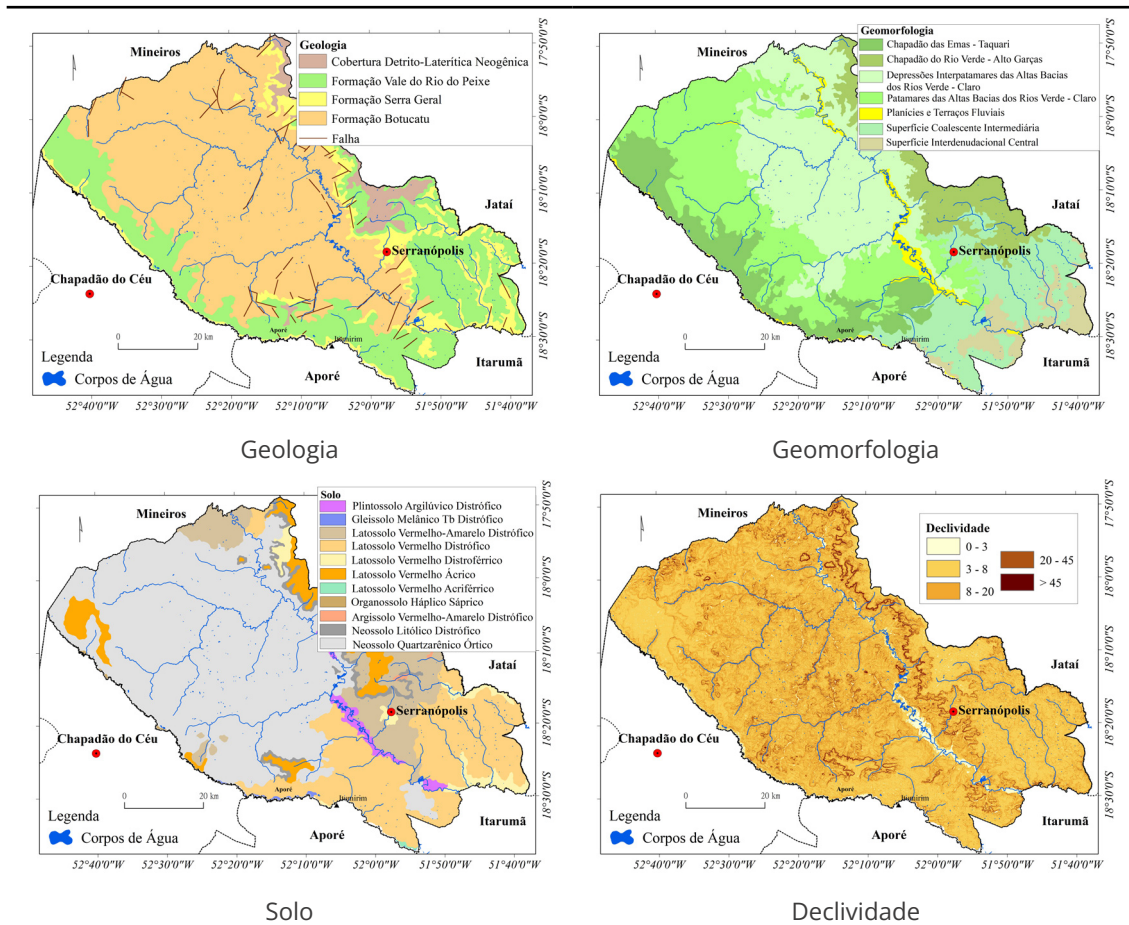


Figura 1: Localização do Município de Serranópolis – GO - Brasil

Fonte: Base Cartográfica – 1:100.000 (IBGE, 2022).

A lito-geomorfologia se caracteriza pela presença predominante da Formação Botucatu, pertencente ao Grupo São Bento, que apresenta litologia de arenitos vermelhos, classificados de finos a médios silicificados, quartzosos e arredondados, seguido da Formação Vale do Rio do Peixe correspondendo às áreas de fundos de vales e depressões. É composta por estratos de arenitos cinza-claros, bege ou róseos, maciços, finos a muito finos, às vezes médios, em geral mal selecionados e com estratificação plano-paralela cruzada subordinada (CPRM/SIC, 2008). É composta pelas unidades geomorfológicas de Depressões Interpatamares das Bacias dos Rios Verde e Claro e Patamares das Altas Bacias dos Rios Verde-Claro, entremeada por compartimentos de Chapadão do Rio Verde – Alto das Garças e Chapadão das Emas-Taquari de solo plano e argiloso (IBGE, 2023) (Figuras 2 e 3).

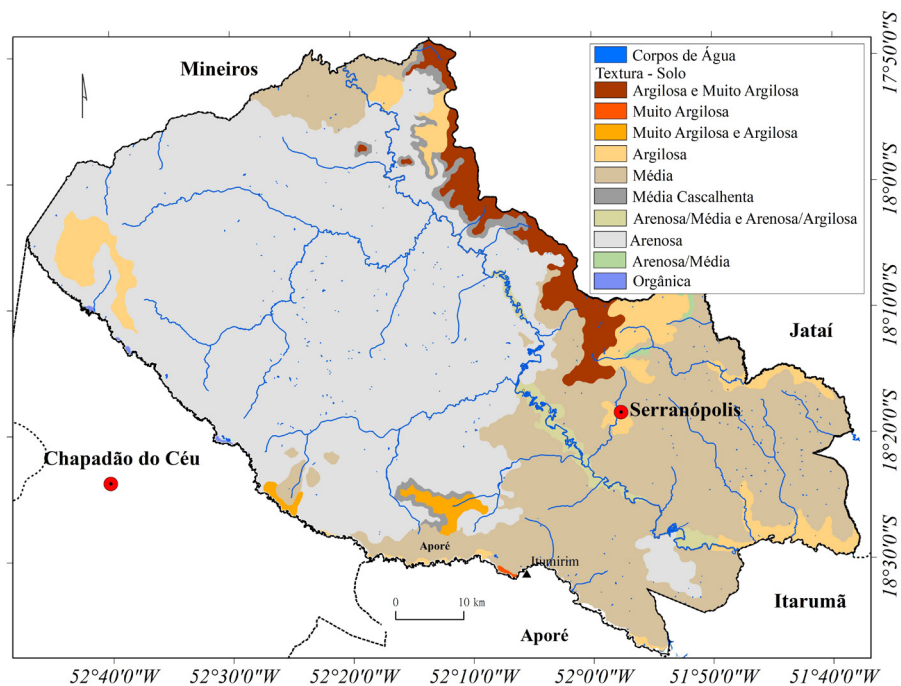


Metadados: Sistema de Projeção UTM – Datum SIRGAS 2000 – Zona 22S.

Figura 2: Aspectos físicos do Município de Serranópolis – GO - Brasil

Fonte: Base de Dados Espaciais – Geologia, Geomorfologia, Solo – 1:250.000 (IBGE, 2023); Imagem SRTM (USGS, 2000).

Área de relevo plano e solo argiloso do tipo Latossolo Vermelho Acríco, onde a vegetação original foi quase que completamente suprimida e substituída por monoculturas. Predominam os Neossolos Quartzarênicos e Litólicos de textura arenosa, caracterizados por forte processo de dissecação, seguidos por Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, ambos de textura média, os quais vêm sendo foco de forte expansão agrícola nos últimos anos (IBGE, 2023).



Metadados: Sistema de Projeção UTM – Datum SIRGAS 2000 – Zona 22S.

Figura 3: Textura-Solo de Serranópolis – GO - Brasil

Fonte: Base de Dados Espaciais –Solo: Textura – 1:250.000 (IBGE, 2023).

O contexto histórico mostra que a atividade pecuária sempre foi marcante na paisagem de Serranópolis, caracterizada predominantemente por solos arenosos, sendo a primeira forma de conversão antrópica em áreas de Cerrado, impulsionada pelas pesquisas agro-nômicas realizadas pela Embrapa e pela implantação de grandes projetos desenvolvimentistas na década de 1970, como o Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para o Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados (PRODECER) e Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO).

Entretanto, na década de 1980, mediante a incorporação de solos mais arenosos e menos produtivos nas atividades agrícolas, houve uma intensificação desta categoria de uso da terra, ganhando forma com a implementação da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e *com-modities* agrícolas de grãos em escala comercial.

Esta dinâmica de mudança ocorreu influenciada pelos subsídios de políticas de fomentos, como o crédito rural concedidos por instituições públicas e privadas, credenciadas ao Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR), extensão e pesquisa com o incremento de tecnologias e siste-

mas de manejo. Por outro lado, observa-se que esse modelo de desenvolvimento econômico regional também proporcionou um intenso processo de fragmentação da vegetação nativa. Essas transformações de usos continuam em movimento, refletindo no cenário atual, apresentando uma grande diversidade de paisagens naturais e antrópicas.

Materiais e Procedimentos Metodológicos

Para a realização do presente estudo foi estruturado um banco de dados geográficos, utilizando os seguintes materiais:

- 1) Informações Estruturantes: Base Cartográfica 2022 – Escala 1:100.000 (Limites Administrativos, Malha Viária e Hidrografia) (IBGE, 2022);
- 2) Informações de Suporte: Base de Dados Espaciais – Geologia, Geomorfologia, Solo - 1:100.000 (IBGE, 2023),
- 3) Informações Derivadas: Imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) – Resolução espacial 30 m (USGS, 2000);
- 4) Dados Meteorológicos: Pluviometria – Série Histórica (2020 a 2021) – Postos Pluviométricos – Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) – Agência Nacional das Águas (ANA);
- 5) Dados Meteorológicos: Radiação Solar Global Incidente ($\text{KJ/m}^2/\text{dia}$) – Série 2020 a 2021 (INMET, 2023);
- 6) *Softwares*: *Sentinel Application Platform*–SNAP *Toolbox* - 9.0.0® (ESA, 2020) e *ArcGIS Program* v.10.1® (ESRI, 2018) Licenciado pelo Laboratório de Geoinformação – Universidade Federal de Jataí – UFJ.

A proposta metodológica da pesquisa foi estruturada para desenvolver-se em duas etapas:

Etapa I - Organização das informações estruturantes e inventário.

O mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal – 2020/2021 foi realizado utilizando imagens do sensor MSI (*Multi-Spectral Instrument*) do satélite Sentinel-2, com correção nível 2A, correção atmosférica (*Bottom of Atmosphere* - BOA) de reflectância, calibração geométrica e

ortorretificação, disponibilizadas pela Agência Espacial Europeia (ESA), no âmbito do Programa Copernicus e Observação da Terra (ESA, 2021). Para tanto, foram utilizadas cenas sem cobertura de nuvens e/ou névoa sobre a área de estudo, correspondentes às órbitas/pontos: 22KCF, 22KDF, 22KCE e 22KDE.

O processamento das imagens (reamostragem dos pixels, recorte e mosaico), foi realizado no *software* SNAP *Toolbox*, v.9.0.0® (ESA, 2020). Foram utilizadas as bandas multiespectrais B8 (infravermelho próximo), B4 (vermelho), B3 (verde), sendo empregada a classificação não supervisionado através do método *K-Means Cluster Analysis* (15 *clusters* e 15 interações), juntamente com *a* edição utilizando o método de interpretação visual, considerando as características básicas dos elementos da paisagem, tonalidade/cor, forma, tamanho/dimensão, textura, elementos associados e local.

Etapa II – Processamento do índice biofísico de vegetação.

Para a obtenção dos dados de caráter multitemporal reportados pelo índice biofísico de vegetação fAPAR foram utilizadas imagens Sentinel-2 de abril/2020 a abril/2021 (Quadro 1).

Quadro 1: Data das imagens Sentinel-2

Data	2020											2021		
Órbita/ Ponto	10 abr	10 mai	14 jun	14 jul	19 jul	13 ago	18 ago	07 set	02 out	07 out	21 nov	10 abr	20 abr	05 mai
KCF	X	X	X	X		X		X	X		X	X		X
KDF	X	X	X		X		X	X	X		X		X	X
KCE	X	X	X		X	X		X		X	X	X		X
KDE	X	X	X		X		X	X	X		X	X		X

Organização: Os autores (2024).

Os dados de entrada para o processamento do índice fAPAR compreendem valores espectrais de 8 bandas do Sentinel-2: B3, B4, B5, B6, B7, B8a, B11 e B12, bem como informações direcionais: $\cos\theta_s$ (*solar_zenith*), $\cos\theta_v$ (*solar_view*), $\cos\phi$ (*elavation_zenith*), usando modelo de transferência radiativa RTM-PROSAIL e algoritmo de redes neurais (Quadro 2).

O modelo RTM PROSAIL calcula a refletância bidirecional do dossel a partir de 400 a 2500 nm, em incrementos de 1 nm, em função de até 16 parâmetros de entrada, que definem pigmentos e teor de água, arquitetura do dossel, fundo do solo, *hot spot*, difusividade solar, bem como observação de geometria (BERGER et al., 2018). Esse modelo constitui-se na combinação do modelo de propriedades ópticas da folha (PROSPECT) (JACQUEMOUND; BARET, 1990) e o modelo de refletância bidireccional do dossel (SAIL) (VERHOEF, 1984).

Quadro 2: Características técnicas do sensor MSI – Sentinel-2

Bandas	Comprimento de onda (µm)	Resolução Espacial (m)	Aplicações
B3	0.54 - 0.58	10	Platô verde, sensibilidade à clorofila total da vegetação.
B4	0.65 - 0.68	10	Máxima absorção de clorofila.
B5	0.70 - 0.71	20	Posição de borda vermelha; correções atmosféricas, linha de base de fluorescência.
B6	0.73 - 0.75	20	Posição de borda vermelha, correções atmosféricas, identificação de carga de aerossol.
B7	0.76 - 0.78	20	Índice de área foliar (LAI), borda do platô NIR.
B8A	0.85 - 0.87	20	Platô NIR, sensibilidade à clorofila, biomassa, LAI e proteína; absorção de vapor d'água; identificação de carga e tipo de aerossol.
B11	1.66 - 0.65	20	Sensibilidade à lignina, amido e biomassa acima do solo da floresta; separação de neve, gelo, nuvem.
B12	2.10 - 2.28	20	Avaliação das condições de vegetação mediterrânea; distinção de solo argiloso para monitoramento da erosão do solo; distinção entre biomassa viva, biomassa morta e solo.

Fonte: European Space Agency (2010).

O modelo RTM PROSAIL calcula índices biofísicos de vegetação, dentre os quais a fAPAR que é determinada pela Equação 1.

$$fAPAR(\theta_s) = 1 - \frac{RFA_r(\theta_s)}{RFA_i(\theta_s)} - (1 - R_s) \frac{RFA_t(\theta_s)}{RFA_i(\theta_s)} \quad (Eq. 1)$$

Em que: θ = Ângulo solar zenital, R_s = Reflectância do solo, RFA_r = Refletida, RFA_i = Incidente e RFA_t = Transmitida.

As métricas do fAPAR indicam o percentual de RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa) absorvido pela vegetação para a realização da fotossíntese e produção de biomassa.

O cálculo do montante de Radiação Solar Absorvida (RSA) pelos diferentes usos e a cobertura vegetal teve como referência a adoção da RFA como 45 % da R_s ($\eta = 0,45$) no período de 24 horas diante da ausência de medições RFA especificamente na região (RUNNING; ZHAO, 2015) (Equação 2).

$$RSA = fAPAR \cdot RFA \quad (MJ / m^2) \quad (Eq. 2)$$

Os valores de RSA absorvida representam a energia disponível para a realização da fotossíntese pelas plantas no comprimento de onda 400 nm a 700 nm, sendo uma variável-chave que influencia a fotossíntese, a transpiração e o balanço de energia na maioria dos modelos de eficiência de produção (OGUTU; DASH, 2013), auxiliando na compreensão do comportamento morfofisiológico da vegetação.

Informações sobre a quantidade de RFA absorvida pela vegetação constituem uma fundamental variável na formação da Produção Primária Bruta, componente essencial do ciclo global do carbono terrestre.

Resultados e Discussão

Índice fAPAR no mosaico de paisagens de Serranópolis

A determinação dos valores de fAPAR foi processada para as diferentes formas de vegetação identificadas no processo de classificação de imagens Sentinel-2 (Tabela 1 e Figura 4).

Tabela 1: Área das classes de uso da terra e cobertura vegetal – 2020/2021

Cód.	Classes	Km ²	(%)	Cód.	Classes	Km ²	(%)
1	Corpos de Água	27,41	0,50	7	Pastagem - Boas Condições	1.063,28	19,24
2	Sede Urbana	3,14	0,06	8	Pastagem - Baixa Qualidade	1.352,26	24,47
3	Agroindústria	0,39	0,01	9	Pastagem Sombreada	240,44	4,35
4	Aeroporto	0,12	0,00	10	Silvicultura	58,51	1,06
5	Agricultura de Grãos	533,84	9,66	11	Cerrado	1.029,92	18,64
6	Cana-de-açúcar	278,57	5,04	12	Formação Florestal	935,98	16,94
TOTAL						5.526,72	100

Organização: Os autores (2024).

Analizando os dados do mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal, datados de 2020-2021, observa-se o predomínio das áreas de pastagens, que correspondem a 2.655,98 km² (48,06%) do município de Serranópolis, constituindo-se na principal atividade econômica, ainda que perdendo espaço para o avanço das áreas agrícolas (agricultura de grãos, cana-de-açúcar e silvicultura) com 870,92 km² (15,76%).

As pastagens estão classificadas em relação ao seu padrão de qualidade, estando diretamente relacionadas ao sistema de manejo praticado. Dessa forma, têm-se: a pastagem em boas condições, com 1.063,28 km² (19,24%); a pastagem de baixa qualidade, com 1.352,26 km² (24,47%); e a pastagem sombreada, com 240,44 km² (4,35%).

Por fim, a cobertura vegetal, representada pelas classes cerrado e formação florestal, ocupando uma área territorial total de 1.965,90 km² (35,58%). Essa cobertura vem apresentando uma perda gradual de espaço, o que se torna motivo de preocupação. Tal perda ocorre em razão da incorporação dos solos arenosos ao sistema produtivo agropecuário, baseada na apropriação da natureza mediante a interação entre ciência e técnica.

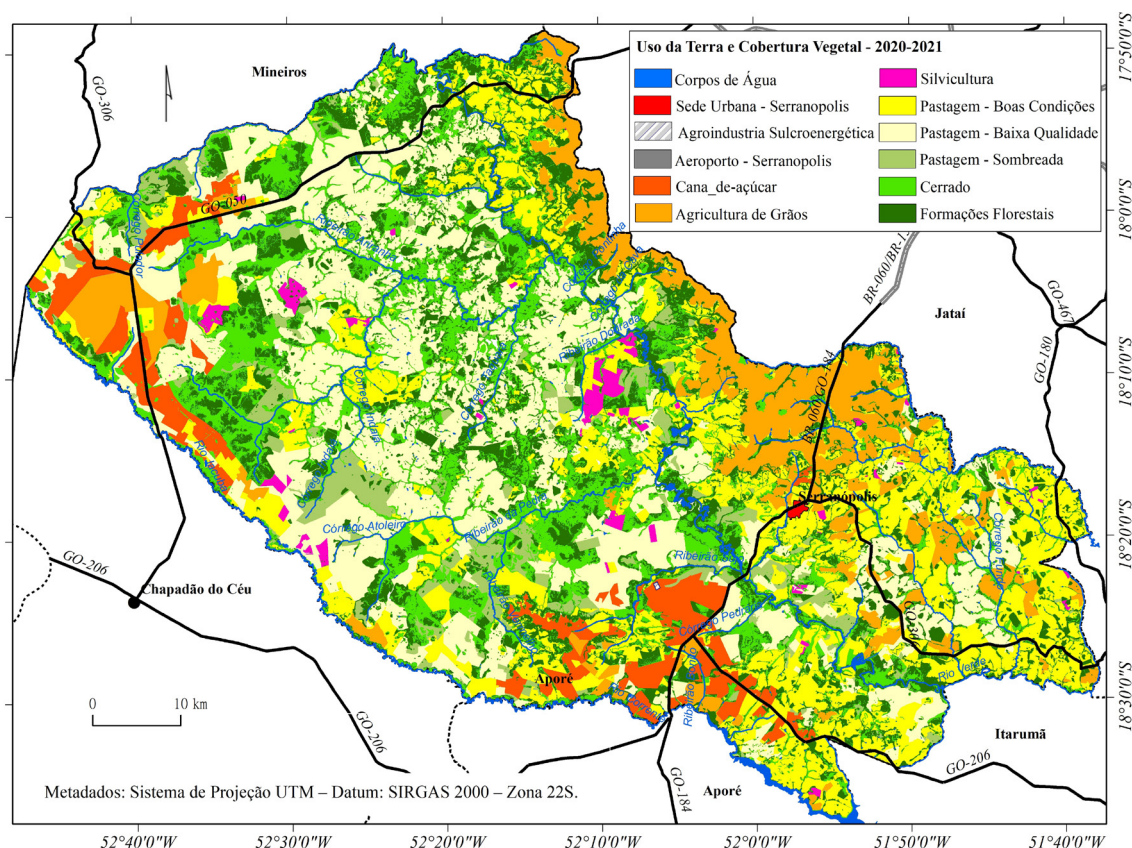


Figura 4: Uso da terra e cobertura vegetal 2020-2021 – Serranópolis, GO

Fonte: Imagem Sentinel-2 (ESA, 2020/2021).

A série estatística histórica mostra que os dados de cana-de-açúcar em 2000 eram inexistentes, em 2006 representava apenas 28 km² de área de plantio, em 2016 apresentou crescimento para um total de 140 km², mantendo esse patamar até a safra 2019/2020. A agricultura de grãos (soja, milho e sorgo) apresentava 315,93 km² no ano de 2000, em 2010 aumentou para 533 km², havendo crescimento para 660 km² em 2016, confirmando a tendência evolutiva das áreas de plantio obtida com a espacialização dos usos (IMB, 2025) (Figura 5).

Dados estatísticos do IMB (2025) mostram que o município tinha 2644.798 cabeças de gado bovinos no ano de 2000. Houve um decréscimo para 205.500 em 2010 e no ano de 2020 atingiu o total de 194.500 (Figura 6). De modo geral, esses dados evidenciam um processo de conversão de áreas de vegetação natural em pastagens, que, por sua vez, dão suporte à expansão agrícola em solos com características frágeis. Esse processo evidencia uma pressão direta sobre as áreas remanescentes do Cerrado. Segundo Trindade e Castro (2015, p. 268),

o uso de solos frágeis pode induzir uma série de impactos ambientais negativos para a região, dentre eles, a erosão (solos menos aptos e de elevada erodibilidade) e a consequente degradação de ecossistemas naturais, pois não são áreas com aptidão para uso agrícola intensivo e tampouco o canavieiro.

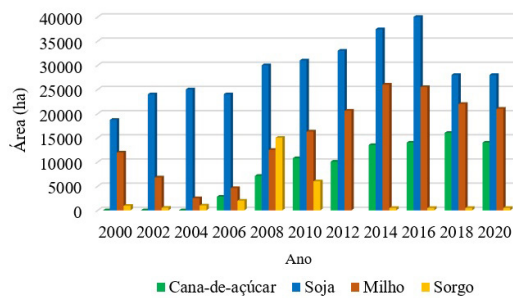


Figura 5: Dados agrícolas

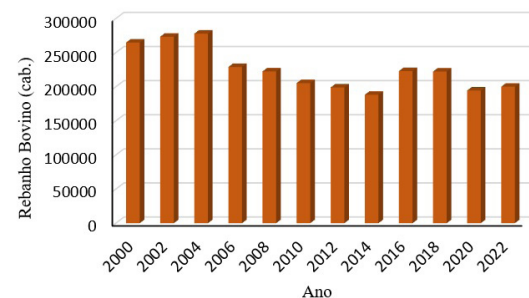


Figura 6: Dados do rebanho bovino

Fonte: Banco de Dados Estatísticos de Goiás: 2000–2023 (IMB, 2025).

O levantamento propiciou uma visão sinóptica do comportamento espaço-temporal do mosaico de paisagens do município de Serranópolis, por meio da resposta de eficiência do uso da radiação solar para realização da fotossíntese, caracterizando a produção de biomassa. Orientado pela aplicação do índice biofísico fAPAR, que possibilitou dessa forma, um dimensionamento da capacidade de absorção do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para as formas de cobertura vegetal.

Na figura 7, é possível observar as nuances relativas à existência de um decréscimo na fixação de carbono pelos diferentes agrossistemas e também pelos remanescentes de vegetação, na transição do período úmido para o período seco, considerando o intervalo espaço-temporal compreendido entre abril/2020 e abril/2021. Esse decréscimo implicou na redução da capacidade de realização da atividade fotossintética pelas plantas, com consequente diminuição do índice de área foliar fotossinteticamente ativa, redução da taxa de clorofila e incremento de biomassa aérea.

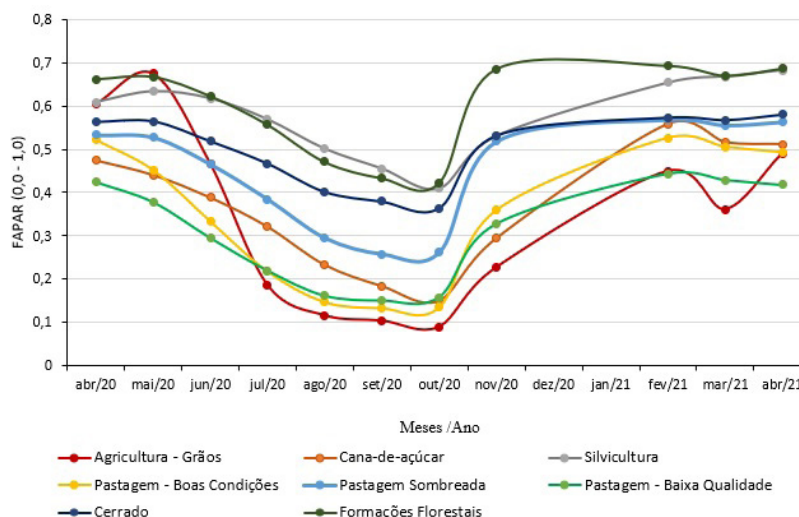


Figura 7: Índice: fAPAR – Imagem Sentinel-2

Fonte: Imagem Sentinel-2 (ESA, 2020, 2021).

É importante destacar que a estiagem por longos períodos influencia diretamente o comportamento da vegetação, afetando o desenvolvimento das plantas, ainda que a área apresente uma cobertura vegetal de porte mais denso, uma vez que a ausência de chuva provoca estresse hídrico e afeta o padrão de reflectância. A análise dos dados fAPAR evidencia a variabilidade sazonal da absorção de CO₂ atmosférico, sendo detectado um declínio dos valores entre os meses de junho a outubro, em uma relação direta com os níveis de precipitação pluviométrica da região do Cerrado. Esse período se caracteriza pela baixa umidade no solo em função da estiagem (Figura 8).

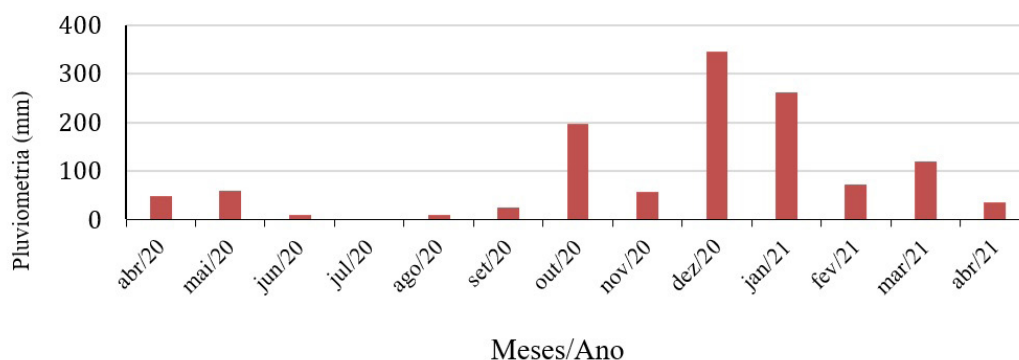


Figura 8: Dados pluviométricos da área de estudo

Fonte: Postos pluviométricos (ANA - SNIRH - Hidroweb, 2020-2021).

Por outro lado, o mês de outubro marca o final do período de estiagem na região, com os maiores níveis de déficits hídricos registrados no período setembro/outubro, com a reposição de água no solo começando no período de outubro/novembro. Tal ocorrência pode ser compreendida por meio dos dados dos postos pluviométricos de Aporé, Chapadão do Céu e Serranópolis, uma vez que, em 2020, foi registrada precipitação de 23,6 mm no dia 22 de setembro, voltando a chover somente a partir da segunda quinzena do mês outubro/2020, totalizando média mensal pluviométrica de 196,3 mm, após a data de aquisição da imagem de satélite utilizada no processamento.

Agricultura de Grãos

A produção de grãos voltada para o segmento de *commodities* agrícolas representa 9,66 % da área total do município de Serranópolis e está em plena expansão em áreas de Neossolos Quartzarênicos e Litólicos classificados com alto nível de fragilidade ambiental. Os valores médios de fAPAR obtidos nesta classe de uso atingiram um patamar médio de 0,65 durante o período úmido (outubro a abril), evidenciando elevada absorção de carbono, por se tratar de cultivares de ciclo curto e genética estruturada para crescimento rápido, tendo impacto direto no nível de capacidade de absorção do CO₂ atmosférico, diante da sua dinâmica espaço-temporal. Exibe efeitos de sazonalidade típica do ciclo de crescimento e desenvolvimento morfofisiológico das culturas, refletindo nas assinaturas espectrais.

No período de estiagem a métrica de fAPAR decresce até 0,1, devido o ciclo de desenvolvimento da segunda safra na região se completa nos meses de junho/julho com a colheita. Nessa fase as plantas de safrinha já não possuem pigmentos fotossintetizantes, pois as folhas já estão secas e nos meses de agosto, setembro e outubro, o solo fica totalmente exposto devido à ausência de cobertura vegetal.

Em estudo de fAPAR realizado por Kamenova e Dimitrov (2020) nos campos agrícolas no norte da Bulgária, a partir do monitoramento de duas safras de trigo em 2016/2017 e 2017/2018, foi obtido coeficiente de determinação de $R^2 = 0,92$ e RMSE = 0,08. Este índice é muito utilizado no monitoramento das lavouras, pois auxilia nas previsões de rendi-

mento da colheita, monitoramento do processo de irrigação inadequado, além de fornecer indicadores que descrevem o desenvolvimento vegetativo das culturas (KAMENOVA; DIMITROV, 2020).

Agricultura: Cana-de-açúcar

O uso agrícola para a produção de cana-de-açúcar equivale a 5,04 % da área total do município, sendo a maior parte da produção destinada à Agroindústria Sucroalcooleira (Energética Serranópolis Ltda). Assim como a atividade agrícola de grãos, que apresenta um intenso movimento de expansão em solos arenosos e de alta fragilidade ambiental. A cana-de-açúcar possui um ciclo de desenvolvimento de 12 meses com período de colheita entre abril e novembro, com resultado médio de fAPAR de 0,56 no período úmido e 0,15 no período seco, reportando a dinâmica espaço-temporal das diferentes fases de desenvolvimento da planta e produção de biomassa da cultura.

Durante o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar são observadas variabilidade sazonal que está relacionada à dinâmica da precipitação, temperatura e radiação fotossinteticamente ativa. É possível identificar picos de absorção de radiação fotossinteticamente ativa bem definidos no período úmido e retração durante a estação de estiagem, refletindo em alta amplitude. Segundo Souza et al. (2019), elevadas temperaturas implicam no ressecamento das camadas superficiais do solo e das folhas das plantas, decrescendo a umidade.

Em monitoramento para seleção de variedade de cana-de-açúcar mais produtiva e auxílio ao plano de colheita realizado por Soares-Filho e Soares (2023) em Serranópolis - Goiás, com o uso de imagem Sentinel-2 e os índices fAPAR, IAF (Índice de Área Foliar), utilizando como variável dependente do rendimento (tonelada de colmos por hectare – TCH), obtiveram coeficiente de determinação $R^2 = 0,932$ tendo o fAPAR como variável do modelo linear de previsão de safras.

Silvicultura

A prática da silvicultura está distribuída de forma bastante irregular e representa 1,06 % do território municipal, tendo se expandido, nos últimos anos, sobre áreas de pastagens degradadas e em solos arenosos, com ausência de manejo de conservação do solo e da água. O eucalipto (*Eucalyptus sp.*) constitui a principal modalidade de produção praticada,

sendo destinado basicamente, à produção de bioenergia para atender à demanda energética de unidades de armazenamento, agroindústrias e outros setores.

A silvicultura segue um sistema de manejo de corte/rebrota dentro de um ciclo temporal. Apresenta valores médios de fAPAR variando de 0,68 no período úmido, reduzindo para 0,40 no período de estiagem. Entretanto, sua amplitude é menor, mantendo uma certa regularidade na capacidade de absorção de carbono atmosférico. Verifica-se maior homogeneidade do dossel e menor variância diante da sazonalidade climática.

Pastagem

A pecuária se constitui na atividade econômica desenvolvida em grandes propriedades rurais e, de acordo com o sistema de manejo adotado, esta classe se subdivide em três modalidades, quais sejam:

- i) A pastagem sombreada ocupa 4,35 % da área territorial municipal. Consiste no binômio pastagem-vegetação, o que explica valores médios mais regulares e menor amplitude em relação às demais classes de pastagens (associação de forrageira com vegetação herbácea e arbustiva, que garante conforto térmico aos animais). Essa classe apresenta valores de fAPAR com 0,57 nos meses de abril/maio/2020, reduzindo para 0,26 durante o período seco. Isto acontece devido ao estresse hídrico, porém se recuperando a partir de novembro/2020 com o início das precipitações na região;
- ii) Pastagem plantada em boas condições representa 19,24 % do município. É caracterizada pelo uso de gramínea *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha*. Apresenta métricas fAPAR que atinge 0,53 no período úmido, valores relativamente mais baixos em relação à pastagem sombreada, ocorrendo redução deste valor para 0,13 no período seco. Há uma sensível redução no nível de atividade fotossintética e na produção de clorofila diante da deficiência hídrica.
- iii) Pastagem plantada de baixa qualidade, também chamada de pastagem degradada, ocupa 24,47% do território municipal. Apresenta patamares médio da fAPAR de 0,44 no período úmido e 0,15 no período seco, correspondendo à baixa capacidade de captura do dióxido de carbono atmosférico durante todo o ano. Tais resultados confirmam

as atribuições que lhe são conferidas, tais como: baixa produtividade, devido à falta de reposição de nutrientes que compõem a fertilidade do solo, e ausência de práticas conservacionistas, como curvas de nível, construção de terraços.

iv) Estas pastagens são caracterizadas geralmente como gramíneas, plantadas sem sistema de manejo adequado para mitigar os impactos ambientais, em um ambiente caracterizado por solos arenosos. O baixo valor da fAPAR reflete em baixo teor de estoque de carbono no solo. Essas características evidenciam o aparecimento de manchas de solo descoberto, denominadas arenização, estando diretamente relacionadas à baixa capacidade de retenção de água no solo, à baixa fertilidade e ao tipo de uso do solo praticado, atingindo completa exaustão dos parcos nutrientes químicos presentes no solo (SCOPEL et al., 2013). Além disso, foram identificados, por meio de imagens de satélite, 24 pontos de ocorrência de processos erosivos (erosão laminar, erosão hídrica e voçorocas).

Ressalta-se, ainda, que a qualidade da pastagem está relacionada à qualidade do manejo adotado. Contudo, seu desenvolvimento apresenta características de sazonalidade, e sua capacidade de produção de biomassa varia ao longo do ano, cujos fatores de crescimento estão ligados às condições de luminosidade, temperatura e precipitação. Segundo Rosa et al. (2014), as pastagens representam três quartos das áreas agrícolas do território nacional e, uma vez bem manejadas, funcionam de forma eficiente na captura de carbono.

Cerrado

A análise da vegetação remanescente, nesse estudo, foi subdividida em Cerrado que compõem 18,64 %. Compreende essa classe a formação savânica, caracterizada por uma vegetação caducifólia. É composta por quatro principais tipos fitofisionômicos: o Cerrado sentido restrito, o Parque de Cerrado, Palmeiral e a Vereda (RIBEIRO; WALTER, 1998).

Também compõem a classe Cerrado as formações campestres, representadas por campo sujo (arbustos e subarbustos), campo limpo e campo rupestre, que possuem estruturas semelhantes, diferencian-

do-se pela presença de substrato rochoso e pela composição florística (RIBEIRO; WALTER, 1998).

A vegetação de Cerrado apresentou fAPAR média da série multitemporal de 0,50. Durante o período chuvoso, essa média aumenta para 0,58 e reduz para 0,36 durante o período de estiagem. Essa formação vegetal é fortemente afetada pelo estresse hídrico sazonal, o que altera sua capacidade de absorção da radiação e eficiência fotossintética, ainda com elevado risco de incêndios florestais.

Utilizando a metodologia baseada em série temporal de imagens Sentinel-2 e modelo RTM PROSAIL, Soares (2023) obteve fAPAR média anual de 0,5 para a cobertura vegetal de Serranópolis com $R^2=0,7997$ e $RMSE=0,065$. Para Chapadão do Céu, a fAPAR média foi 0,4 para a cobertura vegetal, $R^2=0,8356$ e $RMSE=0,059$. Já para Aporé com fAPAR média de 0,5 para a cobertura vegetal, com $R^2=0,7561$ e $RMSE=0,065$. Oliveira et al. (2009) realizaram estudo da fAPAR em regiões fitoecológicas brasileiras, por meio de uma série temporal derivada do NDVI/AVHRR. Como resultado, obtiveram valor médio de fAPAR de 0,52 para a área de savana. Segundo Sano et al. (2019), formações como esta apresentam, na faixa espectral do visível, menores valores de reflectância, isto acontece devido à maior absorção de energia incidente por parte dos pigmentos fotossintetizantes.

Formação Florestal

As formações florestais correspondem a 16,94% do município e se caracterizam por tipos de vegetação densa, com espécies arbóreas e formação de dossel. Compõem as formações florestais, a mata ciliar, mata de galeria, quais estão associadas aos cursos d'água, ocorrem em terrenos bem drenados ou mal drenados, além do cerradão e da mata seca que englobam diversos níveis de caducifólia e ocorrem nos interflúvios (RIBEIRO; WALTER, 1998).

O valor médio anual de fAPAR foi de 0,59 para a formação florestal. Durante o período chuvoso, a fAPAR média atingiu patamar de 0,68. Esses valores demonstram maior regularidade da resposta da fAPAR durante a série multitemporal de dados. Verifica-se uma maior capacidade de absorção de radiação fotossinteticamente ativa e de produção de biomassa verde, caracterizando uma vegetação de porte mais denso.

Esses valores reduzem para 0,42 no período de estiagem devido ao estresse hídrico sazonal e às características da vegetação, como o seu processo de caducifolia, mesmo que em menor grau em relação às formações savânicas, porém mantendo, ainda assim, valores mais elevados em relação às demais formações de vegetais.

Putzenlechner et al. (2022) obtiveram como resultado uma média da frequência de fAPAR derivado de Sentinel-2 de 0,55 para a estação da primavera e 0,76 para a estação do verão. Soares (2023) obteve métricas de $R^2 = 0,7997$ e $RMSE = 0,065$ no município de Serranópolis, em estudo que utilizou o índice fAPAR a partir de dados espectrais do Sentinel-2, aplicado na identificação de áreas homogêneas de fitofisionomias do Cerrado no Sudoeste Goiano.

De acordo com Sano et al. (2019, p. 209), devido à “maior densidade da vegetação e da presença de água nas folhas, a manutenção dos pigmentos permite, portanto, que tais fitofisionomias realizem atividade fotossintética durante o período seco.”

Essas nuances são importantes no contexto ambiental, pois expressam a capacidade de absorção de energia utilizada na atividade de fotossíntese e, conseqüentemente, a capacidade de absorção de dióxido de carbono (CO_2) e produção de biomassa vegetal.

Radiação Solar Absorvida

A partir dos dados de Radiação Solar Global Incidente ($MJ/m^2/dia$), referentes ao período de abril/2020 a abril/2021 (estações meteorológicas de Jataí, Mineiros, Cassilândia e Costa Rica), foi calculada a quantidade de Radiação Solar Absorvida (RSA MJ/m^2) (Figura 9). As curvas de radiação solar absorvida pelas formas de vegetação e usos apresentam comportamentos similares às curvas de fAPAR durante o período de monitoramento. Evidenciando o comportamento das plantas sob os efeitos da sazonalidade provocada pelo estresse hídrico no período seco, assim como as taxas mais elevadas de captura de CO_2 atmosférico no período úmido.

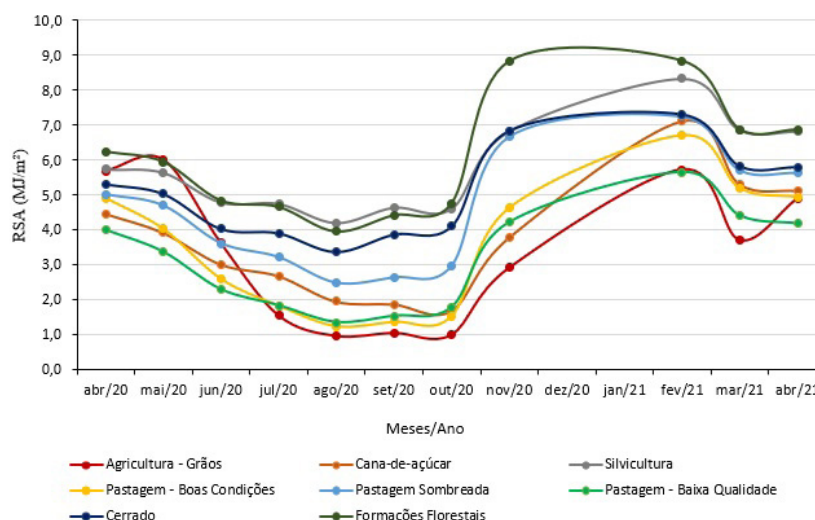


Figura 9: Radiação Solar Absorvida – RSA

Fonte: Imagem Sentinel-2; Radiação Global Incidente – MJ/ m² (INMET, 2021).

As figuras 7 e 9 reportam os valores de fAPAR e RSA (MJ/m²), respectivamente, os quais indicam baixos valores para os agrossistemas e formação vegetal para o mês de outubro/2020. Essa redução foi ocasionada pela ausência de precipitação no período da aquisição de imagem sem cobertura de nuvem que data de 07/10/2020. A ocorrência de precipitação no mês de outubro/2020 teve início a partir do dia 15/10/2020 totalizando média mensal de 196,3 mm.

Análise Estatística Descritiva e Modelo de Regressão Linear

A partir da aplicação do uso de estatística descritiva e também de modelo de regressão linear simples (Figura 10), com base nas variáveis de quantidade de Radiação Solar Absorvida (RSA) e no índice de Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (fAPAR), foram analisadas as diferentes formas de vegetação e usos considerados. Observa-se que a agricultura de grãos apresenta $R^2=0,9128$ e RMSE= 0,065, com alta variabilidade e amplitude (desvio padrão de 0,2094 e coeficiente de variação de 61,09 %). Para a cana-de-açúcar, obteve-se $R^2=0,8472$ e RMSE= 0,059, também com alta variabilidade e amplitude (desvio padrão de 0,1425 e coeficiente de variação de 38,52 %). Fontana et al. (2012) obtiveram forte correlação entre o índice de vegetação por

diferença normalizada (NDVI), derivado de imagens MODIS, e a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (FRFAi), em trabalho realizado com o monitoramento de duas safras de soja em Cruz Alta – RS, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9472$.

Para a cana-de-açúcar, Oliveira (2015) obteve, por meio de análise de regressão linear aos oito meses de idade da cultura, na safra de 2012/2013, um coeficiente de determinação $R^2 = 0,450$, a partir do índice NDVI, utilizando imagens Landsat 8 Sensor OLI. Já Jin et al. (2022) obtiveram, a partir do índice fAPAR também derivado de imagens Landsat um $R^2 = 0,93$ e RMSE = 0,09 para cultivos em geral.

A silvicultura apresenta menor variabilidade durante o ano, mesmo sob os efeitos do estresse hídrico, com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,4203$ e RMSE= 0,073. Seu desvio padrão foi de 0,0905 e coeficiente de variação, de 15,72 %. Cantinho (2012) obteve coeficiente de determinação $R^2 = 0,200$ no período úmido e $R^2 = 0,150$ para o período seco, a partir do processamento do NDVI, que possui relação direta com a fAPAR, utilizando imagens MODIS/Terra e VGT/SPOT.

A pastagem plantada em boas condições apresentou $R^2 = 0,8887$ e RMSE= 0,058, seu desvio padrão de 0,1637 e coeficiente de variação de 47,02 % refletindo alta dispersão e amplitude. A pastagem sombreada apresenta correlação linear positiva com coeficiente de determinação $R^2 = 0,7675$ e RMSE = 0,064. Possui padrão diferenciado, com maior regularidade durante o ano, médias mais altas em relação às demais as pastagens, apresentando desvio padrão de 0,1253 e coeficiente de variação de 27,92 %.

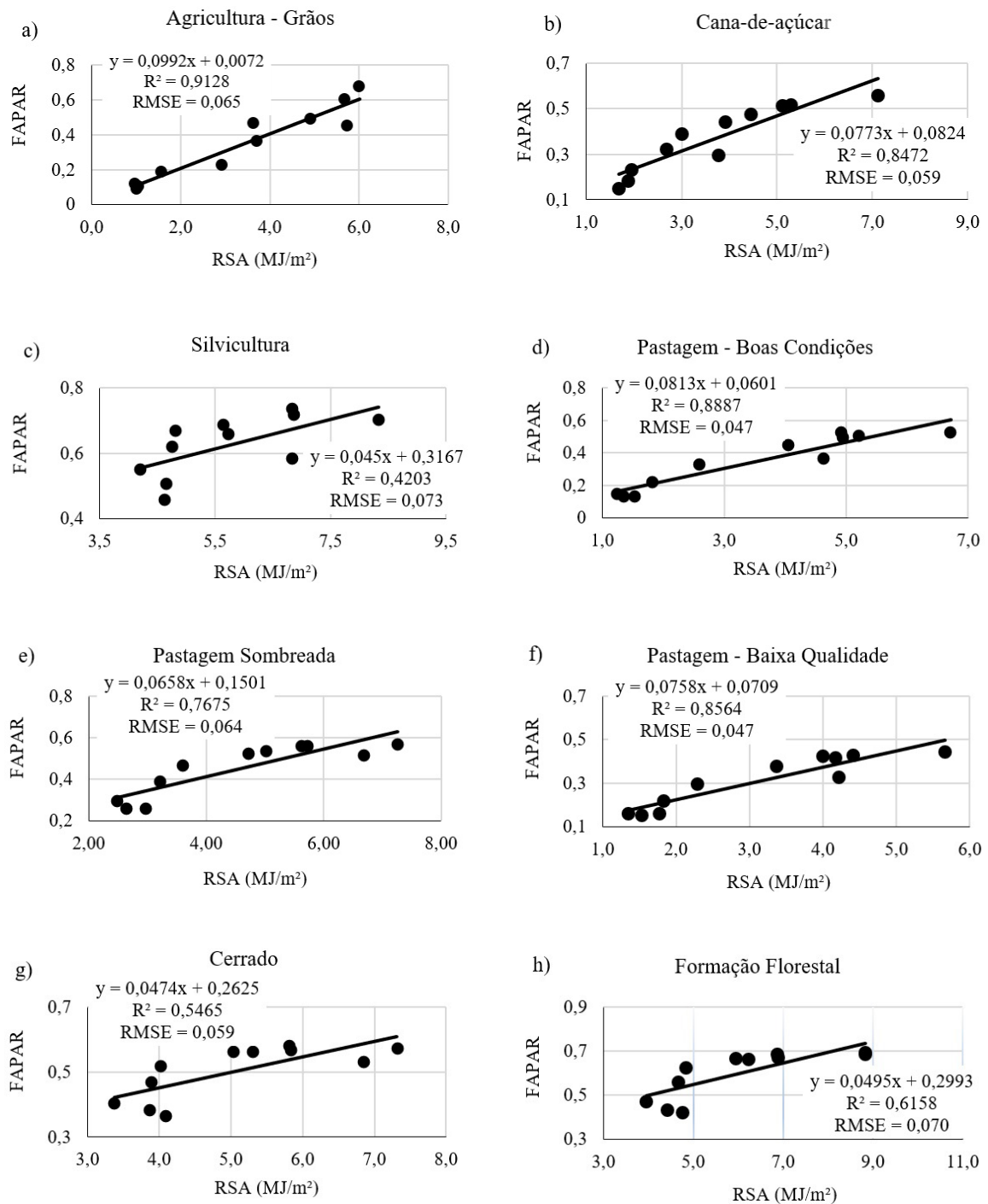


Figura 10: Modelo de Regressão Linear do Uso da Terra e Cobertura Vegetal

Fonte: Índice de vegetação biofísico: fAPAR – Imagem Sentinel-2.

Já a pastagem plantada de baixa qualidade também apresenta coeficiente de determinação $R^2 = 0,8564$ e $RMSE = 0,047$. Possui alta variabilidade e amplitude, com desvio padrão de 0,1187 e coeficiente de variação de 38,37 %, caracterizando valores médios de fAPAR mais

baixos durante toda a série multitemporal. Esses resultados não divergem dos encontrados por Jin et al. (2022) para pastagens em geral, que apresentaram $R^2 = 0,880$ e $RMSE = 0,11$, proveniente de fAPAR obtida a partir de imagens Landsat.

Para o Cerrado, o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,54$ e $RMSE = 0,059$, com baixa amplitude e baixa dispersão apresentando desvio padrão de 0,0836 e coeficiente de variação de 16,68 %. A composição por fitofisionomias com menor densidade da classe Cerrado apresenta características de caducifólias e, portanto, possui alta sensibilidade em relação à deficiência hídrica, o que provoca uma acentuada perda de pigmentos fotossintetizantes quando comparada com as demais fitofisionomias mais densas. Com isto, há a diminuição de absorção de radiação e aumento do nível de reflectância desse tipo vegetação.

Para a formação florestal, o coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 0,62$ e $RMSE = 0,070$. Apresenta baixa amplitude e dispersão, possui desvio padrão de 0,1075 e coeficiente de variação de 17,99 %. Em estudo sobre fAPAR realizado por Jin et al. (2022), utilizando imagens Landsat, foram obtidos valores de coeficiente de determinação de $R^2 = 0,78$ e $RMSE = 0,08$ para vegetação de arbustos e $R^2 = 0,85$ e $RMSE = 0,13$ para vegetação de florestas.

Essa classe caracteriza-se por tipos de vegetação mais densa com espécies arbóreas e formação de dossel. É composta por mata ciliar e a mata de galeria, as quais estão associadas aos cursos d'água, além do cerradão e da mata seca, que englobam diversos níveis de caducifólia e ocorrem nos interflúvios (Ribeiro; Walter, 1998).

A classe de vegetação mata seca e o cerradão apresentam características de caducifólias e, conseqüentemente, redução de pigmentos fotossintetizantes. Com isto, há a diminuição na absorção de radiação e aumento do nível de reflectância desse tipo vegetação, além dos efeitos de sazonalidade devido à sensibilidade em relação à deficiência hídrica, ainda que em menor proporção quando comparadas com vegetação de menor densidade.

É importante destacar que, em virtude da maior densidade da vegetação e da constante presença de água nas folhas das plantas, a manutenção dos pigmentos de clorofilas permite que essas fitofisionomias

realizem atividade fotossintética durante o período seco. Ou seja, as folhas se mantêm fotossinteticamente ativas, mesmo com os efeitos de amplitudes constatados.

Estes valores refletem a atividade de fotossíntese e o montante de radiação solar absorvida, em uma relação direta ao longo do ciclo de produção de biomassa aérea e a mensuração dos fluxos de CO₂ entre a superfície e a atmosfera (SHELESTOV et al., 2015).

Considerações Finais

A análise da variável biofísica fAPAR derivada de dados Sentinel-2, processadas utilizando o modelo RTM PROSAIL, apresenta grande relevância no apoio a projetos de monitoramento e avaliação da dinâmica de desenvolvimento da cobertura vegetal em ecossistemas e agrossistemas sob a ótica da eficiência do uso da radiação para captura do CO₂ atmosférico e realização da fotossíntese para incrementar a produtividade primária bruta.

Pelo fato de a fAPAR possuir relação direta com a atividade fotossintética da vegetação promovendo troca de energia entre o dossel e a atmosfera, evidenciando a variabilidade de estoque de CO₂ atmosférico para cada categorias de agrossistemas e ecossistemas é caracterizada como relevante variável biofísica utilizada no monitoramento da vitalidade da vegetação.

Na análise, observa-se relações entre precipitação e a variável biofísica fAPAR, estando correlacionada à perda de folhas no período seco, ao conteúdo de clorofila, produção de biomassa e os processos biofísicos do dossel como a fotossíntese e transpiração, possibilitando estabelecer análises quanto ao status de serviço ambiental.

Nesta perspectiva, utilização de geotecnologias como sensoriamento remoto orbital (Sentinel-2) apresenta vantagens significativas devido a ampla área de cobertura, baixo custo operacional e geração de grande volume de dados em curto espaço de tempo.

Assim sendo, tem destaque a realização de monitoramento, utilizando geotecnologias *open source* e *open data* que propiciam potencial para observar, medir e mapear a variabilidade espaço-temporal dos alvos na superfície terrestre, num contexto de dinâmica da paisagem

provocada por desmatamentos, conversões de usos e degradação do meio natural, respondendo a indagações da comunidade científica e auxiliar nas tomadas de decisões para fins de planejamento e ordenamento territorial.

Agradecimentos

Financiamento da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa Produtividade em Pesquisa (PQ2) por meio do processo 307438/2021-0. Esta pesquisa foi desenvolvida com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Estado de Goiás (FAPEG), com recursos da Chamada 03/2022 – Programa de Auxílio à Pesquisa Científica e Tecnológica, processo 202310267000870.

Referências

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) – Hidroweb – Dados Postos Pluviométricos: 2020-2021*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ASSAD, E. D. *et al.* Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas. In: BUNGENSTAB, D. J. *et al.* (Org.). *ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*. Planaltina, DF: Embrapa, 2019. p. 153-168.

BASTIAAMSEN, W.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 94, n. 3, p. 321–340, 2003.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Brasil se compromete a reduzir emissões de carbono em 50%, até 2030*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/brasil-se-compromete-a-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>. Acesso em: 12 abr. 2024.

CANTINHO, R. Z. *Avaliação de propriedades físicas de dosséis de eucalyptus spp. mediante aplicação de técnicas de sensoriamento remoto*. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, 2012.

DONG, T. *et al.* Evaluation of chlorophyll-related vegetation indices using simulated Sentinel-2 data for estimation of crop fraction of absorbed photosynthetically active radiation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, n. 8, p. 4049–4059, 2015

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Planaltina, DF: Embrapa, 2015. 375 p.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *GMES Sentinel-2 Mission required document*. 2010. Disponível em: <www.esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2_MRD.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. *Imagens Sentinel-2 Sensor MSI – 2020-2021*. Disponível em: <https://datacopernicus.eu/>. Acesso em: 15 mai. 2021.

FALGE, E. *et al.* Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 113, n. 1–4, p. 53–74, 2002.

FIELD, C.; RANDERSON, J. *et al.* Carolyn. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, v. 51, p. 74–88, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579400066V>. Acesso em: 10 mai. 2021.

FONTANA, D. *et al.* Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor MODIS. *Agrometeorologia*, v. 71, n. 4, p. 563–571, 2012.

GOIÁS. *Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal*. (Org.) MOREIRA, M. L. O.; MORETON, L. C.; ARAÚJO, V. A. de; LACERDA FILHO, J. V. de; COSTA, H. F. da. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC - FUNMINERAL, 2008.

GOBRON, N.; VERSTRAETE, M. M. Fraction of absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR): assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables. *Technical Report Version 8*, Global Terrestrial Observing System – FAO, 2009.

HUNT Jr., E. R. *et al.* Estimation of carbon sequestration by combining remote sensing and net ecosystem exchange data for northern mixed-grass prairie and sagebrush-steppe ecosystems. *Environmental Management*, v. 33, p. 432–441, 2004.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Dados Demográficos de 2010 e População Estimada em 2024*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2024.

_____. *Divisão de Geociências. Mapas Ambientais: Geologia, Geomorfologia, Pedologia – Revisão 2023*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 05 mar. 2023.

_____. *Divisão de Geociências. Base Cartográfica 1:100.000 – 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2024.

IMB – INSTITUTO MAURO BORGES DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. *Banco de Dados Estatísticos de Goiás: 2000–2023*. Disponível em: <https://www.imb.go.gov.br/bde/>. Acesso em: 02 mar. 2025.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Banco de dados meteorológicos (2020–2021)*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 05 abr. 2024.

JIN, H. *et al.* Generating high spatial resolution GLASS fAPAR product from Landsat images. *Science of Remote Sensing*, v. 6, p. 1–14, jul. 2022.

KAMENOVA, I.; DIMITROV, P. Evaluation of Sentinel-2 vegetation indices for prediction of LAI, fAPAR and fCover of winter wheat in Bulgaria. *European Journal of Remote Sensing*, p. 1–20, nov. 2020.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v. 9, n. 3, p. 747–766, dez. 1972.

OGUTU, B. O.; DASH, J. An algorithm to derive the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by photosynthetic vegetation. *New Phytologist*, v. 197, p. 511–523, 2013.

OLIVEIRA, G. S. *Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função dos índices de vegetação utilizando técnicas de sensoriamento remoto*. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, SP, 2015.

OLIVEIRA, L. M. T. *et al.* Estudo da fAPAR em regiões fitoecológicas brasileiras através de série temporal derivada do NDVI/AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. *Anais....* São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2855-2863. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.14.33/doc/2855-2863.pdf>. Acesso em: 23 maio 2021.

PUTZENLECHNER, B. *et al.* Fractional vegetation cover derived from UAV and Sentinel-2 imagery as a proxy for in situ fAPAR in a dense mixed-coniferous forest. *Remote Sensing*, v. 14, p. 1-26, 2020.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Org.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina, DF: EMBRAPA, 1998. p. 87-166.

RODRIGUES, C. C. F. *Produtividade primária bruta para áreas de cana-de-açúcar e cerrado na bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu – SP*. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1569>. Acesso em: 20 abr. 2025.

ROSA, R.; SANO, E. E.; ROZENDO, J. dos S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. *Sociedade & Natureza*, v. 26, n. 2, p. 333-351, 2014.

RUNNING, S.; ZHAO, M. *Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H) and Year-end GapFilled (MOD17A2HGF/A3HGF) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (Collection 6)*. 2019. 33 p.

User's Guide, 4. Disponível em: <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD17UsersGuide2019.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

SANO, E. E. *et al.* Reflectância da vegetação. In: MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (Org.). *Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 189-223.

SELLERS, P. *et al.* Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, v. 275, p. 502-509, 1997.

SENNA, M.; COSTA, M.; SHIMABUKURO, Y. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling, and remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, v. 110, p. 1-8, 2005.

SOARES, C. B. R. Índice fAPAR aplicado na discriminação de fitofisionomias do Cerrado no Sudoeste Goiano. In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA, 15., 2023, Palmas. *Anais...* Campina Grande, PB: Realize, 2023. p. 1-17. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/edicao/detalhes/anais-do-xv-enanpege>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SOARES-FILHO, J. N.; SOARES, C. B. R. Produtividade de cana-de-açúcar: modelo metodológico baseado em série de índices biofísicos de vegetação. *Revista Agri-Environmental Sciences*, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2023.

SCOPEL, I. *et al.* Levantamento de áreas sob arenização e relações com o uso da terra no Sudoeste Goiano e no sudoeste do Rio Grande do Sul – Brasil. *Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia*, v. 5, n. 5, p. 24-47, 2013. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/45749>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SHELESTOV, A. *et al.* Mapping of biophysical parameters based on high resolution EO imagery for JECAM test site in Ukraine. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, Milan, Italy, v. 26, n. 31, p. 1733-1736, 2015.

SOUZA, J. C. *et al.* Dinâmica espacial e sazonal da temperatura, umidade e estresse hídrico em diferentes tipos de cobertura vegetal. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 37, p. 80-94, 2019.

TRINDADE, S. P.; CASTRO, S. S. Mudanças no uso e impactos da expansão canavieira sobre solos frágeis no sudoeste goiano. In: CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. (Org.). *Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade*. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 243-270.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Earth Explorer – Downloads de imagens Landsat, SRTM. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

VEGA-ARAYA, M.; ALVARADO-BARRANTES, R. Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales (Tropical Journal of Environmental Science)*, v. 53, n. 2, p. 60-96, 2019.

VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, v. 16, n. 2, p. 25-141, 1984.

WEISS, M.; BARET, F. *2ToolBox Level 2 products: LAI, fAPAR, FCOVER*. v. 1.1. 2016. 53 p. Technical report. Disponível em: https://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_L2B_V1.1.pdf. Acesso em: 8 jun. 2021.

Cleonice Batista Regis Soares

Doutoranda em Geografia na Universidade Federal de Jataí, mestre em Geografia pela Universidade Federal de Goiás – Campus Regional de Jataí, e graduada em Geografia (Licenciatura e Bacharelado) pela Universidade Federal de Goiás. Rua Riachuelo nº 1530 - Setor, R. Riachuelo, 1530 - Samuel Grahman, Jataí, Goiás, Brasil, 75804-020
Email: cleoniceregis@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4115-9854>

Alécio Perini Martins

Doutor em Geografia pelo Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. Realizou estágio pós-doutoral no Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo. Bolsista de Produtividade

em Pesquisa nível 2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Docente nos cursos de Graduação e Pós-graduação em Geografia da UFJ e credenciado no Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFU/Pontal. É líder do grupo de pesquisa "Monitoramento e modelagem ambiental por geoprocessamento".

Rua Riachuelo nº 1530 - Setor, R. Riachuelo, 1530 - Samuel Grahán, Jataí, Goiás, Brasil, 75804-020

Email: alecioperini@ufj.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4485-0336>

Recebido para publicação em agosto de 2024.

Aprovado para publicação em junho de 2025.