

ÍNDICE fAPAR APLICADO NA DISCRIMINAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS DO CERRADO NO SUDOESTE GOIANO

Cleonice Batista Regis Soares¹

RESUMO: A vegetação do Cerrado se constitui em importante sumidouro de dióxido de carbono atmosférico, demonstrando sua relevância na redução das emissões de gases do efeito estufa e importância na prestação de serviços ambientais ao planeta. Neste contexto, objetivou-se avaliar a eficácia do índice fAPAR na discriminação de regiões homogêneas correspondentes às fitofisionomias do Cerrado identificadas em remanescentes de vegetação no Sudoeste Goiano, mediante uso de imagens Sentinel-2 e modelo de transferência radiativa RTM-PROSAIL integrados na plataforma SNAP *Toolbox*. Os resultados obtidos possibilitaram discriminar: áreas úmidas com variabilidade espacial de fAPAR entre 0,2 a 0,4 no período chuvoso e 0,0 a 0,2 no período seco, provocando estresse hídrico na vegetação e afetando fortemente sua reflectância. As formações florestais apresentam maiores valores do índice fAPAR em toda a série multitemporal com maior produção de biomassa verde, demonstrando maior vigor vegetativo com valores acima de 0,6 e reduzindo para 0,4 a 0,6 no período seco. As formações savânicas apresentaram valores de fAPAR entre 0,3 a 0,4 no período chuvoso e 0,1 a 0,3 no período seco, demonstrando sua alta sensibilidade à deficiência hídrica. As formações campestres apresentam fAPAR 0,3 a 0,4 no período chuvoso e 0,0 a 0,2 no período seco com forte perda de pigmentos fotossintetizantes. A utilização dessas informações se destaca pela sua eficiência e relevância no desenvolvimento de projetos de monitoramento do balanço global do carbono, apresentando alto nível de confiabilidade e compondo as variáveis climáticas essenciais nos estudos de ecossistemas terrestres pelo Programa Global de Observação do Clima (GCOS).

Palavras-chave: Remanescente de Vegetação, Índice de Serviço Ambiental, Geotecnologias.

RESUMEN: La vegetación del Cerrado es un importante sumidero de dióxido de carbono atmosférico, demostrando su relevancia en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero e importancia en la provisión de servicios ambientales al planeta. En este contexto, el objetivo es evaluar la efectividad del índice fAPAR en la discriminación de regiones homogéneas correspondientes a las fitofisionomías del Cerrado identificadas en remanentes de vegetación en el sudoeste de Goiás, por medio de imágenes Sentinel-2 y el modelo de transferencia radiativa RTM-PROSAIL integrados en la plataforma SNAP *Toolbox*. Los resultados obtenidos permitieron discriminar: humedales con variabilidad espacial de fAPAR entre 0.2 a 0.4 en época lluviosa y 0.0 a 0.2 en época seca, provocando estrés hídrico en la vegetación y afectando fuertemente su reflectancia. Las formaciones forestales presentan valores más altos del índice fAPAR a lo largo de la serie multitemporal con mayor producción de biomasa verde, demostrando mayor vigor vegetativo con valores superiores a 0.6 y reduciéndose a 0.4 a 0.6 en la época seca. Las formaciones de sabana mostraron valores de fAPAR entre 0.3 y 0.4 en la época lluviosa y de 0.1 a 0.3 en la época seca, demostrando su alta sensibilidad al déficit hídrico. Las formaciones de pastizales presentan una fAPAR de 0.3 a 0.4 en la época lluviosa y de 0.0 a 0.2 en la época seca, con fuerte pérdida de pigmentos fotosintéticos. El uso de esta información se basa en su eficiencia y relevancia en el desarrollo de proyectos de monitoreo del balance global de carbono, presentando un

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí - UFJ, cleoniceregis@gmail.com.

alto nivel de confiabilidad y componiendo las variables climáticas esenciales en los estudios de ecosistemas terrestres por parte del Programa Global de Observación del Clima (GCOS).

Palabras clave: Remanente de Vegetación, Índice de Servicios Ambientales, Geotecnologías.

INTRODUÇÃO

O Brasil se coloca dentre os principais países responsáveis pelos desmatamentos, com especial destaque para a expansão das atividades agropecuárias principalmente no Cerrado. Neste contexto, a vegetação do Cerrado comporta-se como importante sumidouro de carbono, mesmo em condições de precipitação abaixo da média, e seu desmatamento implica em alterações, tais como aumento de temperatura da superfície, do ar, redução dos níveis de evapotranspiração e aumento do escoamento superficial.

Assim, o impacto da ação humana nos ecossistemas tornou o monitoramento das alterações na biosfera terrestre em um fator de extrema importância no contexto da detecção de variabilidade multitemporal quanto à estrutura dos ecossistemas e indicadores de mudanças.

Diante deste cenário, estudos de vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, os quais se fundamentam na compreensão da resposta espectral de uma dada cobertura vegetal, consistindo em um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais (PONZONI, 2002).

Desta forma, os índices de vegetação vêm sendo muito utilizados nos estudos de vegetação, os quais correspondem à medidas espectrais utilizadas como protocolos na análise 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).

Neste contexto, a fAPAR se destaca pela relação direta com a eficiência de uso da radiação (EUR), pois o seu valor consiste na resultante do modelo de transferência radiativa no dossel que é calculado instantaneamente, estando correlacionado com a estrutura do dossel, propriedades ópticas dos elementos da vegetação e das condições de iluminação (WEISS e BARET, 2016).

O índice fAPAR é derivado da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), que compreende ao intervalo de comprimento de onda entre 400 a 700 nm, radiação que é absorvida pela vegetação durante a fotossíntese e fornece informações sobre o funcionamento de um dossel devido a alta capacidade de descrever a troca de energia entre a superfície e a atmosfera, e é um indicador da produtividade da vegetação.



sendo assim, destaca que a PAR absorvida (APAR) consiste em quatro elementos, que são: i) a PAR de incidência (INPAR); ii) INPAR que é transmitido pelo dossel (TPAR); iii) TPAR que é refletido pelo solo de volta ao dossel (RPARs); e iv) TPAR e INPAR que são refletidos pelo solo e no topo do dossel (RPARcs) (BASTIAANSSEN e ALI, (2003).

A fAPAR é bem conhecida como uma das variáveis climáticas essenciais (ECVs) pelo sistema Global Climate Observing (GCOS) aplicada em estudos de ecossistemas terrestres e o sensoriamento remoto por satélite fornece uma maneira eficaz de gerar esses produtos biofísicos regularmente, como o satélite Sentinel-2 que dispõe de boa qualidade de informações espectrais, dispondo do acréscimo de bandas na faixa do *red edge* e duas bandas no infravermelho de ondas curtas, além das faixas do visível e infravermelho próximo utilizadas tradicionalmente (HU et al., 2020).

Assim, a pesquisa objetivou avaliar a eficácia do índice fAPAR na discriminação de regiões homogêneas correspondentes às fitofisionomias do Cerrado identificadas em remanescentes de vegetação no Sudoeste Goiano, mediante uso de imagens Sentinel-2 e modelo de transferência radiativa RTM-PROSAIL integrados na Plataforma SNAP *Toolbox*.

METODOLOGIA

Área de pesquisa

A área de pesquisa compreende aos municípios de Serranópolis, Chapadão do Céu e Aporé, inserida no retângulo geográfico de 17°30'00"/19°15'00" de latitude Sul e 51°30'00"/53°00'00" de longitude Oeste. Possui área territorial total de 10.599,98 km² (IBGE, 2019), e população estimada de 25.612 habitantes (IMB, 2022) (Figura 01).

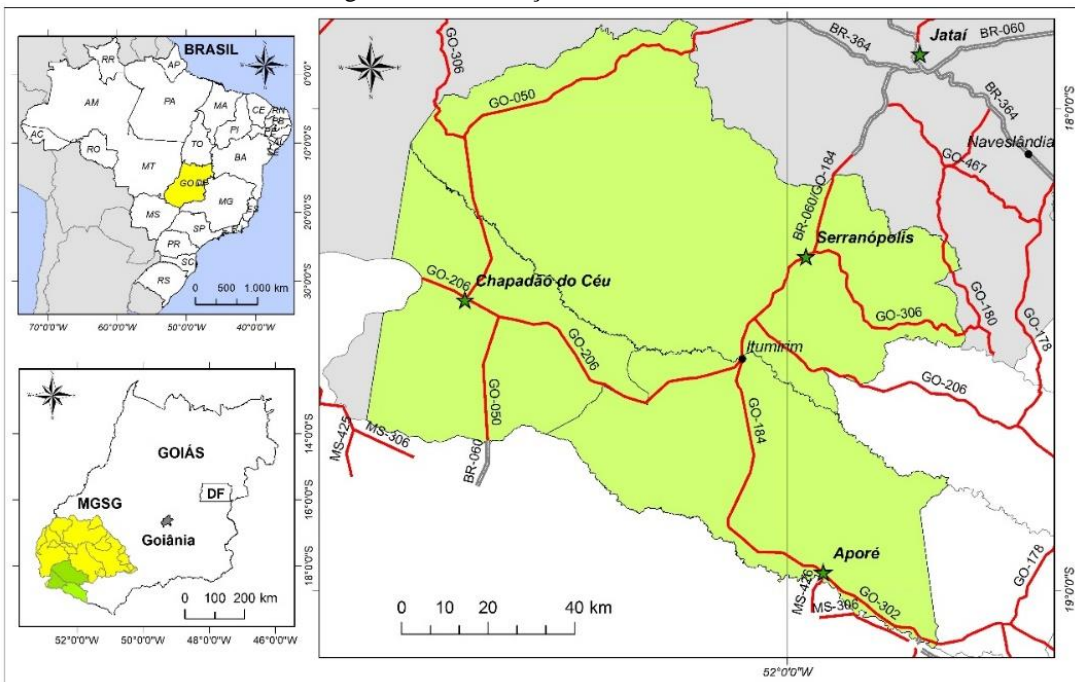
Para tanto, destaca-se alguns parâmetros utilizados para definir este recorte espacial de pesquisa:

- i) Dados provenientes do Censo Agropecuário do IBGE (2017), mostram que o modelo de uso da terra e cobertura vegetal na área de pesquisa denota prática intensa de desmatamento, seguindo um movimento de expansão das áreas de cultivo de grãos do segmento *commodities* agrícolas, cana-de-açúcar e a silvicultura tendo como modalidade o eucalipto (*eucalyptus.sp*), com finalidade básica de produção de bioenergia para atender a demanda energética de unidades de armazenamento, agroindústrias e outros;
- ii) Abriga três (3) usinas sucroenergéticas em operação, totalizando 61.900 ha de área plantada, sendo os municípios de Serranópolis com 16.000 ha, Aporé com 18.300 ha e Chapadão do Céu com 27.600 ha, segundo dados do IBGE (2018) e disponibilizado pelo Instituto Mauro Borges (IMB, 2020);



iii) Posição geográfica estratégica lhe confere destaque no cenário econômico por ser atravessada pela rodovia BR-060, BR-364 (sentido Leste-Oeste), BR-158, BR-060/GO-184, GO-184 (sentido Norte-Sul), constituindo-se em importantes vias de escoamento de sua produção de grãos e biocombustíveis. Estas características lhe conferem grande mobilidade e possibilidades de investimentos devido sua ligação com grandes mercados consumidores como a Região Metropolitana de Goiânia, Distrito Federal, Cuiabá e São Paulo e os portos de Santos (SP) e Paranaguá (PR).

Figura 01. Localização da área de estudo.



Fonte: Base Cartográfica Digital – IBGE (2017). Elaboração: A autora (2023).

Materiais:

A proposta metodológica baseou-se na utilização dos seguintes materiais:

- 1) Informações Estruturantes (*mídia digital*): Cartografia de Base - Base Contínua – Escala 1/100.000 (limites administrativos, hidrografia, malha viária) – (IBGE, 2016, 2017);
- 2) Informação de inventário na produção de cartografia temática de 2021 e 2022 para determinação da área de cobertura vegetal e processamento do índice de vegetação biofísico fAPAR: SENTINEL-2 Sensor *Multi-Spectral Instrument* (MSI) de nível 2A *bottom of atmosphere* (BOA), cenas 22KCE, 22KCF, 22KDE, 22KDF, 22KCD e 22KDD, resolução espacial 10 e 20 m, resolução temporal de cinco dias e radiométrica de 16 bits (ESA, 2023);
- 3) Dados Meteorológicos: Radiação Global Incidente (KJ/m²/dia) - 2021 e 2022 – Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – Estações: Jataí, Mineiros, Cassilândia e Costa Rica;



4. Softwares: i) SNAP *Toolbox* – Sentinel Applications Platform v.9.0.0® ESA (2022); ii) ArcGIS v.10.6.1® ESRI (2018) – (SIG), licenciado pelo Laboratório de Geoinformação – Universidade Federal de Jataí - UFJ.

Procedimentos Metodológicos

O processamento das imagens Sentinel-2 referentes às órbitas/pontos: 22KCF, 22KDF, 22KCE, 22KDE, 22KCD e 22KDD, foi realizado no *software Sentinel Applications Platform* – SNAP - v.9.0.0®ESA (2022) para o mapeamento da cobertura vegetal (2021/2022), utilizando o classificador *K-Means Cluster Analysis* com os parâmetros de 15 *clusters* e 15 interações para particionar as áreas remanescentes de vegetação. Na etapa seguinte foi realizada a fase de edição utilizando o método de interpretação visual, considerando as características básicas dos elementos de interpretação como: Tonalidade/Cor, Forma, Tamanho/Dimensão, Textura, Elementos Associados e Local.

Para a obtenção da série multitemporal dos dados de fAPAR, importante bioindicador do vigor da vegetação, produção de biomassa verde e processos ecossistêmicos. Foram utilizadas imagens Sentinel-2 sem cobertura de nuvens no período de tempo compreendido entre fevereiro de 2021 e maio de 2022. As imagens processadas foram fatiadas em 10 classes, variando entre 0,0 a 1,0, representando a variabilidade espacial da índice fAPAR (Quadro 1).

O processamento do fAPAR, consiste na utilização do modelo de transferência radiativa RTM PROSAIL e tem como arquitetura de dados de entrada, informações espectrais de oito 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*), $\cos\phi$ (*elevation_zenith*) e algoritmo de redes neurais (ESA, 2010) integrados na plataforma SNAP *Toolbox*.

Quadro 01. Imagens Sentinel-2 utilizadas no processamento do índice de vegetação biofísico fAPAR.

Data	2021													2022				
	19 fev	24 fev	10 abr	15 abr	20 abr	05 mai	19 jun	24 jun	24 jul	13 Ago	18 ago	02 set	07 set	12 set	20 abr	25 abr	10 mai	25 mai
T22KCF	X		X			X	X		X		X			X		X	X	
T22KDF		X			X	X	X		X		X	X				X		X
T22KCE		X	X			X	X		X		X	X			X		X	
T22KDE		X	X			X	X		X		X	X			X		X	
T22KCD		X		X		X		X	X	X			X			X	X	
T22KDD		X			X	X	X		X	X			X			X	X	

Fonte: Imagens Sentinel-2 (MSI) - (ESA, 2021); Organização: A autora (2023).



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, definindo pigmentos e teor de água, arquitetura do dossel, fundo do solo, *hot spot*, difusividade solar, bem como observação de geometria (BERGER et al., 2018).

Este modelo é determinado pela combinação do modelo de propriedades ópticas da folha - PROSPECT (JACQUEMOUND e BARET, 1990) e o modelo de reflectância bidireccional do dossel - SAIL (VERHOEF, 1984).

O modelo PROSAIL calcula índices biofísicos de vegetação, dentre os quais destaca-se a fAPAR que é determinada pela equação 1.

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

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

A determinação do quantitativo de energia radiante absorvida foi realizado a partir dos dados de Radiação Global (RG) Incidente ($Kj/m^2/dia$) das estações meteorológicas do INMET: Jataí (A016), Mineiros (A026), Cassilândia (A742) e Costa Rica (A760).

Os valores de Radiação Fotossintética Ativa (RFA) absorvido representam a energia de luz disponível para a produtividade da planta (400 nm a 700 nm) (OGUTU e DASH, 2013). Diante da ausência de medições RFA na região, foi adotado RFA 45% da RG no período de 24 horas (RUNNING e ZHAO, 2015), conforme a equações 2 e 3.

$$RFA = \eta \times R_g, 24 \text{ hs (KJ/m}^2) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RSA = fAPAR \times PAR \quad (\text{Eq. 3})$$

REFERENCIAL TEÓRICO

Os índices biofísicos de vegetação na geração de dados e informações apoiados em sensoriamento remoto têm grande relevância no desenvolvimento de projetos de monitoramento dos ciclos globais do carbono apresentam alto nível de confiabilidade.

Neste contexto, destaca-se a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) que tem uma relação direta com a eficiência de uso da radiação (EUR). Segundo Dong et al., (2015), estudos recentes indicam que apenas a parte da PAR absorvida pelos



componentes fotossintéticos de um dossel está diretamente relacionado à fotossíntese e produção de biomassa.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR) caracterizada como um índice biofísico representando mediante valores de 0,0 a 1,0, sendo 0,0 remete a áreas com baixíssima ou ausência total de atividade fotossintética e 1,0 indicando que a vegetação está com crescimento ativo e alta atividade fotossintética.

A fAPAR caracteriza as trocas de energia entre dossel e a atmosfera, é extensivamente usado em modelos que representam a transferência de energia, carbono, água e biogeoquímica de ecossistemas terrestres (SENNA, COSTA e SHIMABUKURO, 2005).

A utilização deste índice biofísico de vegetação como o fAPAR e outros, constituem em relevantes parâmetros enquanto indicadores da fotossíntese e transpiração do dossel (SELLERS, et al. 1997).

Evidencia-se assim, que a realização de estudos demonstrando o fluxo da variação fotossintética e sua relação utilizando dados multiespectrais tornou-se importante procedimento metodológico para fornecer informações que reportam o *status* da vegetação no contexto da caracterização e mensuração de indicadores agroambientais, como o serviço ambiental na captura de CO₂ pelas diversas classes de usos da terra e cobertura vegetal.

A fAPAR também constitui num dado de entrada para estimar medidas de produtividade primária bruta (PPB) e produtos de índice de vegetação (VI) muito utilizados na avaliação a partir de imagens de satélites (ZHANG, ZHAO e LIN, 2020).

Outro fator importante, se refere a fAPAR derivado de imagem Sentinel-2, pois sua amostragem espectral fornece potencialmente um alto nível de informações sobre a estrutura e as propriedades ópticas do dossel em comparação com o uso das bandas espectrais clássicas de vermelho e infravermelho próximo implementadas na maioria das outras abordagens (WEISS e BARET, 2016).

Novelli et al. (2019), ressaltam que os dados espectrais do Sentinel-2 podem fornecer informações multitemporais e espaciais detalhadas e consistentes para monitorar o *status* do vigor das plantas e seus padrões sazonais relacionados ao ciclo de vida biológico da vegetação.

Sendo assim, estes parâmetros de eficiência da absorção da radiação no processo fotossintético da vegetação por meio da utilização de sensores remotos orbitais apresentam indicadores referentes ao vigor e produtividade da vegetação, pois está relacionada de forma direta com a disponibilidade de água e nível de nutrição (fisiologia e morfologia).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

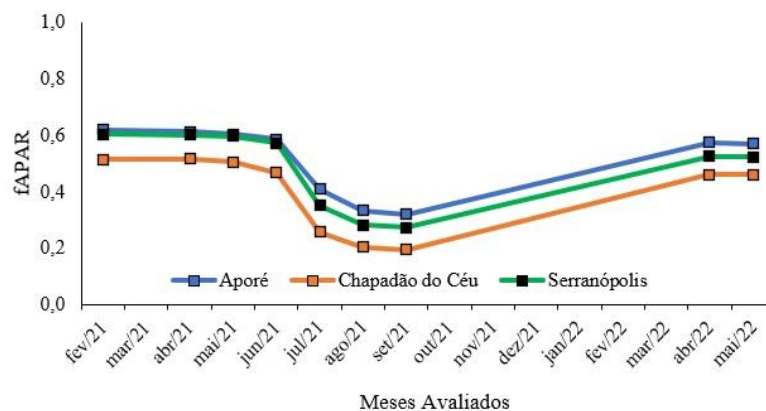
Os índices biofísicos de vegetação se aplicam em estudos de monitoramento objetivando detectar mudanças nas variações espaciais e temporais da composição da cobertura vegetal e sua atividade fotossintética (HENDRICKS, 2004).

Assim, o processamento do índice fAPAR utilizando as imagens Sentinel-2 e o modelo RTM-PROSAIL, forneceu uma caracterização espaço-temporal do comportamento espectral da cobertura vegetal na área de estudo quanto ao nível da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, além de sinalizar quanto ao nível de eficiência da conversão desta energia solar em biomassa verde compreendido entre o período fevereiro/2021 a maio/2022, como mostra o Gráfico 01.

De modo geral, o município de Aporé apresenta valores médios de fAPAR mais altos em função do expressivo quantitativo de vegetação mais densa, pertencente à formação florestal que possui maior capacidade de absorção da radiação solar no seu processo de fotossíntese durante todo o espaço-temporal e a formação savânica com quantitativos mais equilibrados.

Em seguida, o processamento no município de Chapadão do Céu resultou em valores médios mais baixos devido as características de estrutura e fisiologia dos remanescentes de vegetação, predominando fitofisionomias que possuem menor capacidade de absorção da radiação solar, como áreas úmidas e as formações campestre e savânica.

Gráfico 01. Índice de Vegetação Biofísico fAPAR da área de estudo.



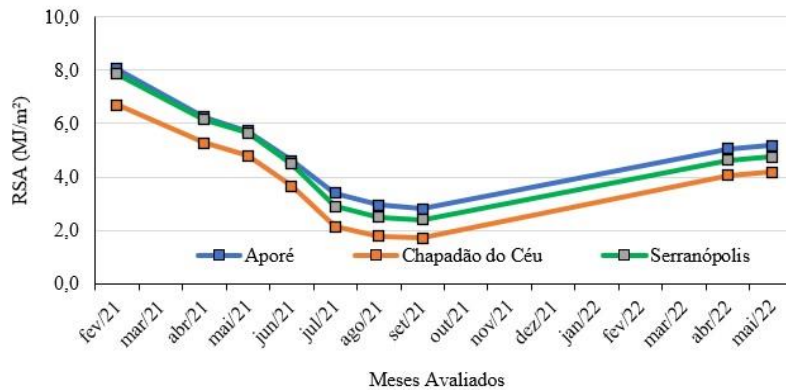
Fonte: Imagens Sentinel-2; Elaboração: A autora (2023).

E Serranópolis caracterizado por valores do processamento da fAPAR que foram intermediários em relação aos demais municípios. Tal fato, se justifica pelo quantitativo de área e de vegetação num primeiro momento, num segundo momento pela presença de solos do tipo neossolos quartzarênicos com o predomínio das formações savânicas e em seguida pela formação florestal.



Em seguida, o Gráfico 02 mostra os níveis de radiação solar absorvida, o que implica na eficiência do uso da radiação incidente e trocas de energia pelos remanescentes de vegetação no espaço-temporal de fevereiro/2021 a maio/2022. Os resultados mostram comportamento similar aos dados normalizados de fAPAR oriundos das imagens Sentinel-2.

Gráfico 02. Radiação Solar Absorvida – RSA ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$) da área de estudo.



Fonte: Dados das Estações Meteorológicas (Jataí, Mineiros, Cassilândia, Costa Rica; Elaboração; A autora (2023).

A partir da aplicação do índice fAPAR na discriminação de regiões homogêneas correspondentes às fitofisionomias do Cerrado presentes na área de pesquisa, foram identificadas: i) Áreas Úmidas; ii) Formação Florestal; iii) Formação Savânica e; iv) Formação Campestre (Figura 02 e Tabela 01).

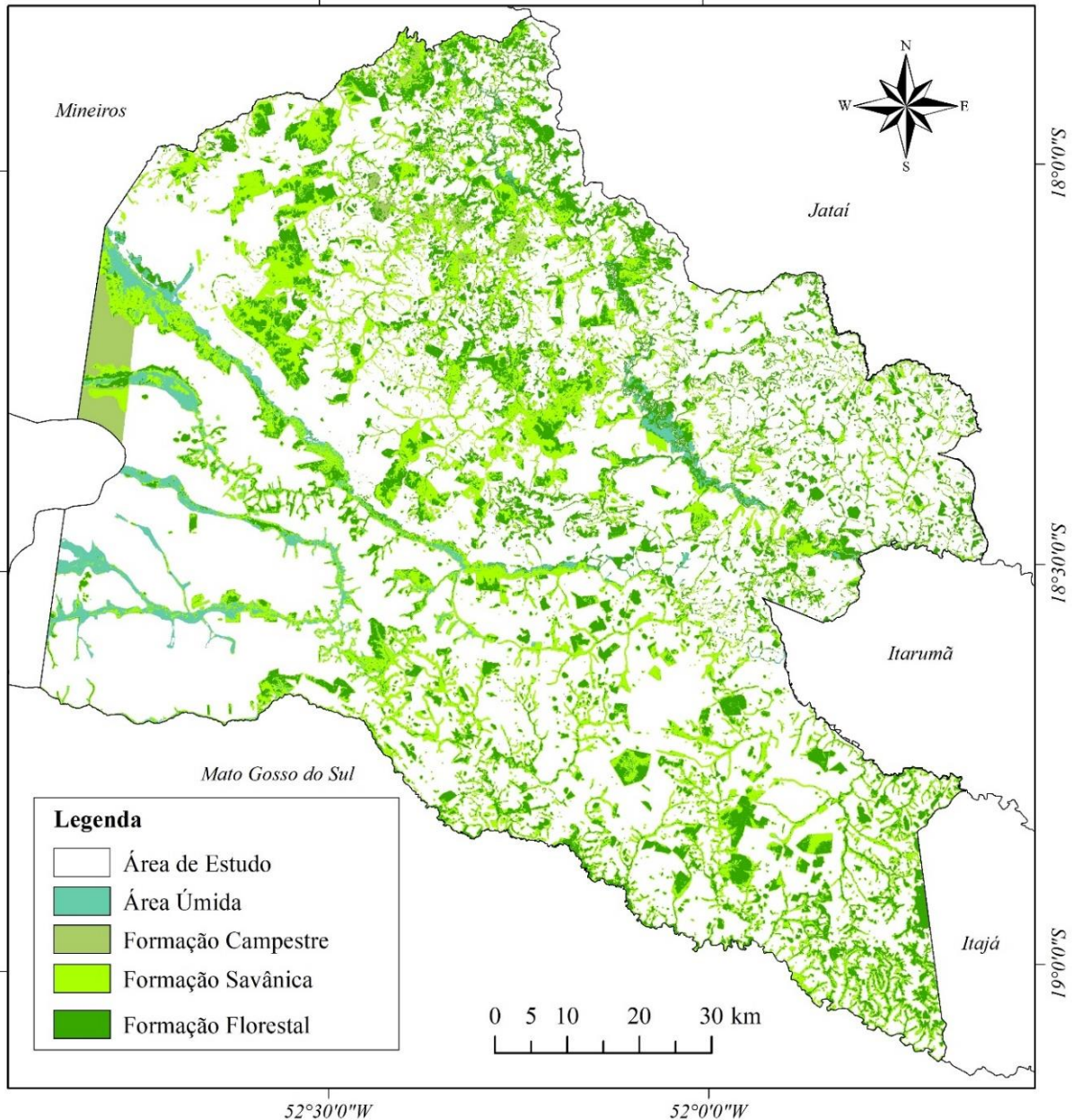
As áreas úmidas identificadas consistem em áreas permanente ou periodicamente alagadas associadas a gleissolos ou a solos hidromórficos, relevo plano sujeitos a períodos longos de alagamentos (IBGE, 2019). As áreas úmidas apresentaram variabilidade espacial de fAPAR nos intervalos de 0,2 a 0,4 durante o período chuvoso e reduzindo estes valores para 0,0 a 0,2 nos meses do período seco, atingida pelo estresse hídrico e afetando fortemente a reflectância.

Estas áreas consistem numa formação associada às planícies aluviais com áreas úmidas sujeitas a inundações frequentes, diminuindo a intensidade dos valores de fAPAR das plantas, pois apresentam resposta de alta absorção espectral nos intervalos do comprimento de onda de 1.300 nm a 2.500 nm e de 1.430 nm a 1.950 nm.

As formações florestais se caracterizam por tipos de vegetação densa com espécies arbóreas e formação de dossel. Compõem as formações florestais, a mata ciliar e a mata de galeria, as 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 e WALTER, 1998).

Figura 02. Fitofisionomias discriminadas a partir da aplicação do índice biofísico fAPAR na área de estudo.



Metadados: Projeção UTM, Datum Horizontal: SIRGAS-2000; Fonte: Imagens Sentinel-2; Elaboração: A autora (2023).

Estas fitofisionomias apresentaram maiores valores de fAPAR na série multitemporal de dados associado a maior produção de biomassa verde demonstrando maior vigor vegetativo com valores acima de 0,6 caracterizando uma vegetação de porte mais denso.

Estes valores de índice diminuem para a classe 0,4 a 0,6 nos meses do período seco, em função do estresse hídrico sazonal e afetando severamente o padrão de reflectância,

Incluindo o processo de caducifolia também, só que em menor grau do que nas formações savânicas, porém mantendo valores mais altos em relação às demais formações de vegetação.

Tabela 01. Valores de áreas das fitofisionomias por município.

Cód.	Município	Fitofisionomia	(km ²)	(%)
1	Serranópolis 5521,84 km ²	Area Úmida	72,56	1,31
		F. Florestal	929,25	16,83
		F. Savânica	932,96	16,90
		F. Campestre	26,18	0,47
Total			1.960,95	35,5
2	Aporé 2896,72 km ²	Area Úmida	22,35	0,77
		F. Florestal	422,03	14,57
		F. Savânica	233,26	8,05
Total			677,64	23,4
3	Chapadão do Céu 2181,42 km ²	Area Úmida	176,65	8,10
		F. Florestal	122,05	5,59
		F. Savânica	192,20	8,81
		F. Campestre	82,39	3,78
Total			573,30	26,3

Fonte: Imagens Fonte: Imagens Sentinel-2; Elaboração: A autora (2023).

É o grupo de formações vegetais que apresentou maior eficiência do uso da luz, alta taxa fotossintética, produção de clorofila, produção de biomassa verde e conseqüentemente maior capacidade de absorção de CO₂ mesmo no período seco, quando é observado uma amplitude maior dos valores de fAPAR.

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 estas fitofisionomias realizem atividade fotossintética durante o período seco, ou seja, as folhas mantêm-se fotossinteticamente ativa, mesmo com os efeitos de amplitudes constatados.

Outro fator refere-se aos menores valores de reflectância na região espectral do SWIR que decorrem da presença de água nas folhas, principalmente em relação às fitofisionomias mais densas. Sano et al., (2019), destacam as faixas de absorção pela presença de elementos bioquímicos, como lignina e celulose, que são mais bem discriminados quando os tecidos das plantas se encontram mais secos.

As formações savânicas apresentam valores de fAPAR nos intervalos de classes 0,3 a 0,5 no período chuvoso e classe de 0,1 a 0,3 no período seco, sendo atingida por forte estresse hídrico sazonal, refletindo na sua capacidade de uso da radiação, sua eficiência fotossintética, e afetando severamente o padrão de reflectância, evidenciando os efeitos de sazonalidade.

Segundo Sano et al. (2019), na faixa do espectro eletromagnético do visível, as formações savânicas, especificamente a fitofisionomia cerrado sentido restrito, apresentam menores valores de reflectância devido a maior absorção de energia incidente por parte dos pigmentos fotossintetizantes.

A formações campestres são representadas por campo sujo (arbustos e subarbustos), campo limpo e campo rupestre que possuem estruturas semelhantes, diferenciando-se pela presença de substrato rochoso e sua composição florística (RIBEIRO e WALTER, 1998). Apresenta valores de fAPAR nos intervalos de classes 0,3 a 0,4 no período chuvoso e classes 0,0 a 0,2 no período seco, refletindo fortemente os efeitos do estresse hídrico, a vegetação fica seca, alterando sua capacidade de uso da radiação, diminui sua eficiência fotossintética, e a amplitude dos valores do índice se acentua, caracterizando bem os efeitos da sazonalidade.

Esta fitofisionomia apresenta predomínio de gramíneas que tem raízes menos profundas, ocasionando alta sensibilidade em relação à deficiência hídrica, provocando forte perda de pigmentos fotossintetizantes quando comparada com as demais fitofisionomias mais densas, diminuição de absorção de radiação e aumento do nível de reflectância desse tipo vegetação.

De modo geral, observa-se que as fitofisionomias do ambiente do Cerrado, apresentam da decréscimo da resposta espectral do período chuvoso para período seco, diminuindo o patamar de reflectância na faixa do verde e à perda de pigmentos fotossintetizantes que fazem a absorção de energia eletromagnética nas regiões do azul e vermelho (SANO, et al. 2019).

Ainda, de acordo com Sano et al. (2019), destaca-se os maiores patamares de absorções para as fitofisionomias mais densas na faixa espectral do visível devido a máxima absorção de clorofila e de vapor de d'água entre 980 nm a 1400 nm em função a manutenção da atividade fotossintética, principalmente durante o período chuvoso.

Modelo de Regressão Linear Simples

A interpretação das métricas estatísticas baseado no modelo de regressão linear simples, o coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro médio quadrático (RMSE), derivadas da relação de influência da quantidade de radiação solar absorvida e do índice de vegetação biofísico fAPAR para a cobertura vegetal nos municípios que compõem a área de estudo, a qual se apresenta da seguinte forma:

i) Os valores médios de fAPAR para a série multitemporal teve média de 0,5 para Aporé com 676,55 km² de cobertura vegetal, desvio padrão igual a 0,13, coeficiente de determinação R²=0,7561 e RMSE=0,065 (Figura 03).

ii) Para Chapadão do Céu com fAPAR média de 0,4 para 574,27 km² de cobertura vegetal, desvio padrão igual a 0,13 e coeficiente de determinação R²=0,8356 e RMSE=0,059 (Figura 04).

iii) Em Serranópolis a fAPAR média foi de 0,5 para 1.940,81 km² de cobertura vegetal e desvio padrão 0,13, coeficiente de determinação R²=0,7997 e RMSE=0,065 (Figura 05).

Figuras 03, 04 e 05. Relação entre a Radiação Solar Absorvida – RSA (MJ/m²) e a fAPAR dos do período compreendido entre fevereiro/2021 a maio/2022.

Figura 03. Aporé

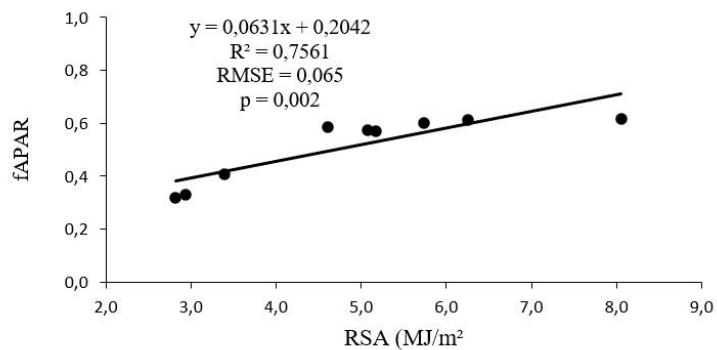


Figura 04. Chapadão do Céu

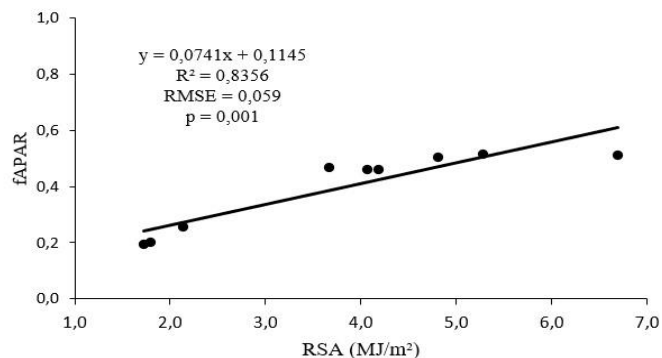
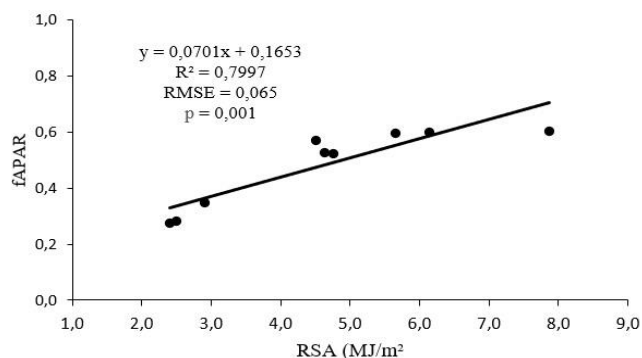


Figura 05. Serranópolis



Fonte: A autora (2023).

Em trabalho realizado por Jin et al. (2022), foram obtidos $R^2 = 0,78$ e $RMSE = 0,08$ para vegetação de arbustos e para vegetação de florestas $R^2 = 0,85$ e $RMSE = 0,13$, a partir da determinação da fAPAR utilizando imagens Landsat 8 Sensor OLI. Já Rodrigues (2018), em trabalho de simulação da Produtividade Primária Bruta (GPP) para o Cerrado nos anos de 2005-2006 e 2015 em Mogi-Guaçu - São Paulo, os valores de coeficientes de determinação R^2 foram de 0,503 e 0,568 utilizando imagem do MOD17A2H e 0,274 e 0,782 com a utilização de imagem Landsat 5 TM e Landsat 8 OLI respectivamente.

Considerando a importância dos índices biofísicos de vegetação na geração de informações e dados produzidos com apoio de sensoriamento remoto tem se destacado pela sua eficiência e relevância no desenvolvimento de projetos de monitoramento do balanço global do carbono apresentando alto nível de confiabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos valores da variável biofísica fAPAR derivada de imagens Sentinel-2 processadas no modelo RTM PROSAIL apresenta grande potencial na avaliação da dinâmica dos remanescentes de vegetação sob a ótica da eficiência do uso da radiação, com a vantagem de redução de interferências da topografia, solos e atmosfera, além de manter a sensibilidade de detecção de variações na cobertura vegetal.

Analisando as feições espectrais, observa-se que a transição do período chuvoso para o período seco, ocorre uma diminuição do patamar de reflectância devido a deficiência hídrica sazonal e à perda de pigmentos fotossintetizantes que absorvem a energia eletromagnética. Contudo, mantendo seu *status* de serviço ambiental quanto a capacidade de eficiência da absorção da radiação no processo fotossintético e captura de gás carbônico durante todo o período espaço-temporal.

Além disso, o uso de dados do satélite Sentinel-2 possui alta resolução espacial, alta resolução temporal e alto nível de amostragem de informações espectrais, tornando-os em ferramentas promissoras para monitoramento dinâmica de absorção, transmissão e reflexão da radiação na vegetação na escala local.

O uso destas ferramentas apresentam vantagens tais como a alta confiabilidade na geração de informações sobre os fluxos de energia e carbono, o uso dos dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos de forma contínua necessários aos estudos de monitoramento, e a aplicação do uso do modelo que possui relação direta com as mudanças de concentrações de

CO₂ na atmosfera, compondo as variáveis climáticas essenciais nos estudos de ecossistemas terrestres.

Por fim, a utilização da fAPAR oriunda das imagens Sentinel-2, permite a extração de informações biofísicas e espectrais multitemporais propiciando a realização de estudos mais contextualizados, além de fornecer importantes subsídios na caracterização das fitofisionomias relacionando aos efeitos da sazonalidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

BASTIAAMSEN, W. G.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. *Agric. Ecosyst. Environ.* V. 94, P. 321–340, 2003.

BERGER *et al.* Evaluation of the PROSAIL model capabilities for future hyperspectral Model environments: A Review Study. **Remote Sensing**. V. 10, N. 85, 2018. P. 01-26.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área territorial - 2019**. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 jun. 2021.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos (2021/2022)**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 02 mar. 2023.

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**. P.1-11, 2015.

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: 27 jan. 2017).

ESA. European Space Agency. **Software SNAP v.9® 2022**. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Acesso em: 12 dez. 2022).

GOIÁS. Instituto Mauro Borges. **Estatísticas Municipais (2020 e 2022)**. Disponível em: <https://www.imb.go.gov.br>. Acesso em: 17 ago. 2023.

HENDRICKS, D. M. Maps in Environmental Monitoring. In: ARTIOLA, J.F.; PEPPER, I. L.; BRUSSEAU, M. L. (Org). **Environmental Monitoring and Characterization**, 2004. P. 69-84.

HU, Q. *et al.* Evaluation of Global Decametric-Resolution LAI, FAPAR and FVC Estimates Derived from Sentinel-2 Imagery. **Remote Sensing**. V. 12, N. 912, P. 01-24, 2020.

JACQUEMOUND, S.; BARET, F. Prospect: A model of leaf optical properties spectral. **Remote Sensing of Environment**. V.34, N. 2, P. 75-91, 1990.

JIN, H. *et al.* Generating high spatial resolution GLASS FAPAR product from Landsat images. **Science of Remote Sensing**. V. 6, P. 01-14, 2022.

MORAES, E. C. *et al.* Curso de sensoriamento remoto no estudo de meio ambiente. In: PONZONI F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a Mata Atlântica**. INPE, São José dos Campos, 2002. P. 8-27.

NOVELLI, F. *et al.* Assimilation of Sentinel-2 Leaf Area Index Data into a Physically-Based Crop Growth Model for Yield Estimation. **Agronomy**. V. 1, N. 9, P. 1-19, 2019.

OGUTU, B.O.; DASH, J. An algorithm to derive the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by photosynthetic elements of the canopy (FAPARps) from eddy covariance flux tower data. **New Phytologist**. V. 197, P. 511-523, 2013.

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. 72f. Dissertação (mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2018.

RUNNING, S. W.; 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), **User's Guide**. V. 3, 2015.

SANO, E. E. *et al.* Reflectância da Vegetação. In: MENEZES, P.R.; ALMEIDA, T; BAPTISTA, G. M. M. **Reflectância dos Materiais Terrestres: Análise e Interpretação**. 1.ed. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2019. P.189-223.

SELLERS, P. J. *et al.* Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, V. 275, P. 502–509. 1997.

SENNA, M. C. A.; COSTA, M. H.; SHIMABUKURO, Y. Fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Amazon tropical forest: A comparison of field measurements, modeling, and remote sensing, **Journal Geophysical Research**., V.110, P. 1-08, 2005.

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. 125-141, 1984.

WEHRMANN, M. F. A soja no Cerrado de Roraima: um estudo da penetração da agricultura moderna em regiões de fronteira. 1999. 247f. Tese (Doutorado em Sociologia) – Curso de Pós-Graduação em Sociologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 1999.

WEISS, M.; BARET, F. **2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER**. V.1.1, [s.n.]. (2016). 53P. Apostila,



XV
ENAN
PEGE

ENCONTRO NACIONAL DE
PÓS-GRADUAÇÃO E
PESQUISA EM GEOGRAFIA



ZHANG, Z.; ZHAO, L.; LIN, A. Evaluating the Performance of Sentinel-3A OLCI Land Products for Gross Primary Productivity Estimation Using AmeriFlux Data. **Remote Sensing**. V. 12. P. 1-22, 2020.

