

PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR: MODELO METODOLÓGICO BASEADO EM SÉRIE DE ÍNDICES BIOFÍSICOS DE VEGETAÇÃO

José Neto Soares Filho¹, Cleonice Batista Regis Soares²

RESUMO:

A cana-de-açúcar representa uma expressiva área de cultivo comercial no Brasil, sendo a predição de rendimento fundamental para orientar tomadas de decisões e antecipar cenários no âmbito da produção agrícola. O estudo teve como objetivo avaliar o agro-modelo de regressão linear múltipla como ferramenta para estimar a produtividade da cana-de-açúcar utilizando como variáveis independentes dados biofísicos de vegetação (fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida - fAPAR e Índice de Área Foliar - IAF) e como variável dependente o rendimento (tonelada de colmos por hectare - TCH). O modelo de regressão linear múltipla foi avaliado na Usina Energética Serranópolis-Goiás na safra 2020, sobre 3.011,57 hectares, representado por 125 talhões comerciais de cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro (cultivares RB867515, CTC17 e CVSP7870) e *status* de cortes variando entre 1º ao 13º. O agro-modelo resultante da modelagem ($\hat{Y} = 1,137X_1 + 29,806X_2 - 113,098$) integrou as variáveis IAF, fAPAR e TCH obtendo Coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,912$) e Raiz quadrada do erro médio (RMSE = 5,649), garantindo a eficácia das variáveis independentes como parâmetros de modelagem para predição de rendimento de colmos.

Palavras-chave: Modelagem. Radiação Fotossintética. Sentinel-2.

SUGARCANE PRODUCTIVITY: METHODOLOGICAL MODEL BASED ON A SERIES OF BIOPHYSICAL VEGETATION INDICES

ABSTRACT:

Sugarcane represents a significant area of commercial cultivation in Brazil, and yield prediction is fundamental for guiding decision-making and anticipating scenarios in the field of sugarcane agricultural production. Thus, the study aimed to evaluate the multiple linear regression agro-model as a tool for estimating sugarcane productivity using biophysical vegetation data (Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed - fAPAR and Leaf Area Index - LAI) as independent variables and yield (tons of stalks per hectare - TSH) as the dependent variable. The multiple linear regression model was evaluated at the Serranópolis-Goiás Energy Plant during the 2020 harvest, covering 3,011.57 hectares and represented by 125 commercial sugarcane plots under rainfed cultivation (cultivars RB867515, CTC17 and CVSP7870), with cutting stages ranging from the 1st to the 13th. The resulting agro-model from the modeling process ($\hat{Y} = 1.137 X_1 + 29.806 X_2 - 113.098$) integrated the variables LAI, fAPAR, and TSH, achieving an adjusted coefficient of determination ($R^2 = 0.912$) and root mean square error (RMSE = 5.649), ensuring the effectiveness of the independent variables as modeling parameters for predicting stalk yield.

Keywords: Modeling. Photosynthetic radiation. Sentinel-2.

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica pela Universidade Nova de Lisboa, Portugal. jose.neto.soares@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4247-0812> ²Geógrafa, Doutoranda em Geografia pela Universidade Federal de Jataí, Jataí-Goiás. cleoniceregis@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4145-9854>.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene de metabolismo fotossintético C4, cuja produtividade de sacarose está diretamente relacionada com a eficiência fotossintética para a produção de fotoassimilados, mediante processos fisiológicos que envolvem a formação de açúcares e seu armazenamento no colmo (Watt et al., 2014).

No sentido de criar meios de aprofundar o conhecimento sobre a interação existente entre produtividade da cana-de-açúcar e a eficiência do uso da radiação solar, os índices biofísicos de vegetação IAF e fAPAR têm ganho maior atenção como variáveis de entrada nos agro-modelos, uma vez que estão diretamente associados à fotossíntese e expressam capacidade de absorção de radiação solar pelo dossel (Shelestov et al., 2015).

No âmbito da modelagem da produção agrícola, alguns modelos de previsão de rendimentos de cana-de-açúcar que são destaque na literatura internacional, como CANEGRO, CANESIM e APSIM, utilizam diferentes variáveis de entrada, tais como edáficas, agrônômicas e meteorológicas (Gunarathana et al., 2019).

No cenário brasileiro, Cardoso et al. (2015) estruturaram um processo de modelagem empírica para estimativa da produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando o período fenológico de maturação, volume acumulado de chuvas (mm) e radiação solar incidente (MJ/m²/dia) na região Sudeste do Brasil.

A estruturação de um modelo matemático de previsão de produtividade agrícola preconiza a integração de regras básicas do método científico, tais como: i) observação de um sistema; ii) formulação da hipótese orientada para explicar as observações; iii) parametrização do comportamento do sistema; e iv) experimentação e validação do modelo (Dourado-Neto et al., 1998; Marin et al., 2014).

Na perspectiva de geração de dados para agro-modelos, o modelo de transferência de radiação – RTM PROSAIL integrado no *software Sentinel Application Platform* (SNAP) apresenta as seguintes vantagens: primeira, é um algoritmo genérico que não exige dados de entrada específicos podendo ser estendido para determinar variáveis biofísicas e bioquímicas da vegetação em escala global; segunda, contém a ferramenta *Simplified level 2 Products Prototype Processor* (SL2P), potencializando a análise de variáveis como: Conteúdo de Clorofila (a+b) no dossel (Cab), Índice de Área Foliar (IAF),

fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (fAPAR), Conteúdo de Água no Dossel (CWC) e fração de Cobertura Vegetal (fCOVER) (Weiss e Baret, 2016).

O índice fAPAR reporta o percentual de radiação fotossinteticamente ativa que é absorvida pelas folhas verdes das plantas para realização da fotossíntese, representada por uma escala de valores que varia de 0,0 a 1,0, de modo tal que 0,0 se refere às áreas sem cobertura vegetal, caracterizando baixíssima ou ausência total de atividade fotossintética, enquanto o valor 1,0 representa áreas com vegetação cujo dossel está com crescimento ativo e alta atividade fotossintética.

Contudo, de toda radiação solar global incidente sobre a vegetação, apenas a fração compreendida na faixa do espectro de ondas eletromagnéticas entre 0,4 e 0,7 μm , denominada radiação fotossinteticamente ativa (RFA), é absorvida pelas plantas (Finch et al., 2004).

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma medida da cobertura vegetal definida pela razão entre a área total da superfície foliar pela área do solo ocupado (Danelichen et al., 2014).

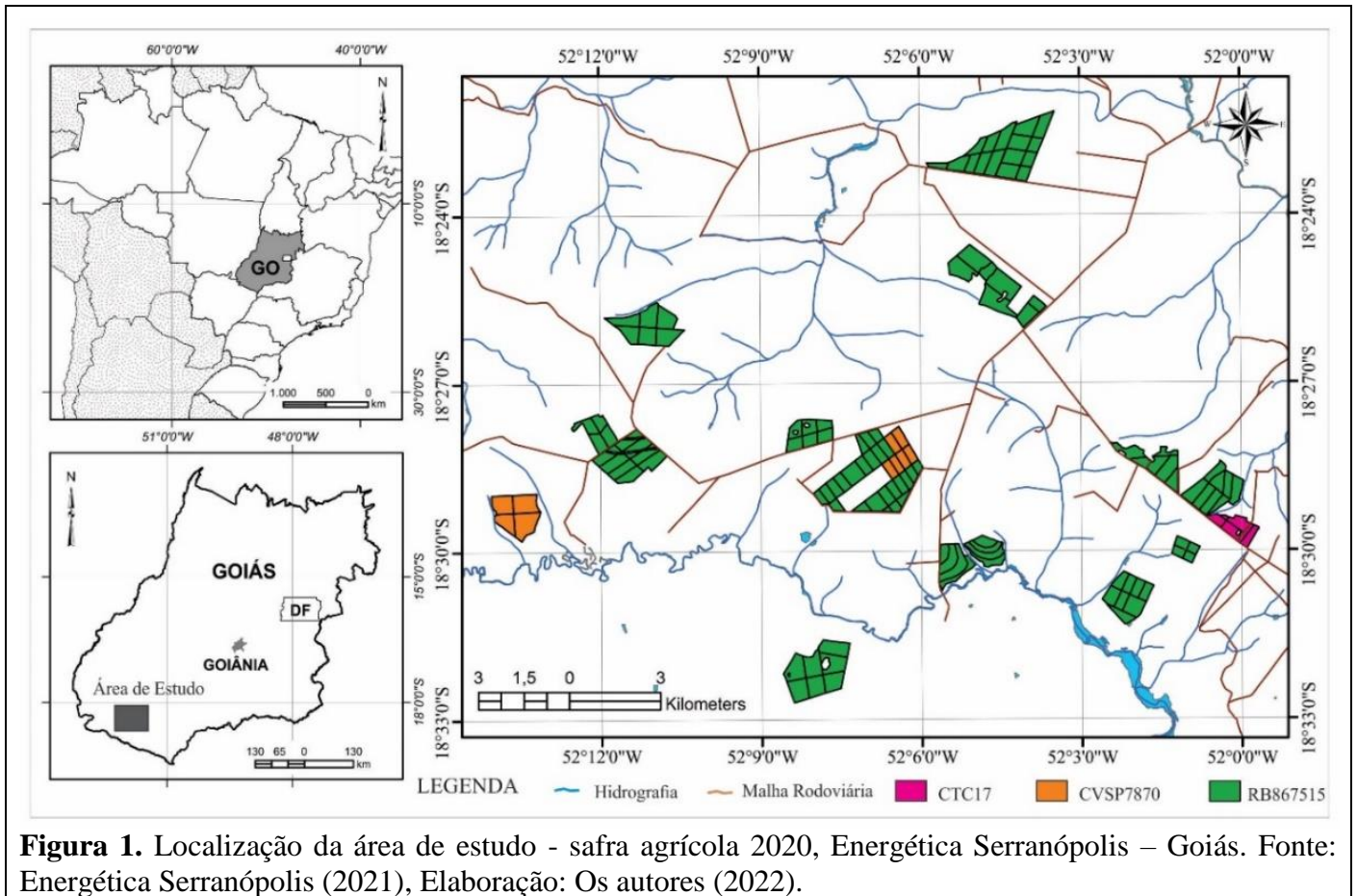
Assim sendo, o estudo objetivou avaliar a eficiência dos índices biofísicos da vegetação (IAF e fAPAR) derivados de série de imagens do satélite Sentinel-2 como parâmetros de entrada no agro-modelo metodológico para orientar estimativas de rendimento na cana-de-açúcar (Tonelada de Colmos por Hectare - TCH).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O experimento foi conduzido na Usina Energética Serranópolis – Goiás durante a safra agrícola 2020. A área avaliada constitui 3.011,57 ha distribuídos sobre 16 fazendas e 125 talhões comerciais de cana-de-açúcar (cultivares RB867515, CTC17 e CVSP7870), variando entre 1° e 13° cortes no ciclo de produção da cultura. (Figura 1).

A região de estudo apresenta clima tropical do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com dois períodos bem definidos: estiagem de maio a outubro e outro chuvoso, de novembro a abril. Apresenta temperatura média anual de 23°C e precipitação pluviométrica média de 1.500 mm (Cardoso, Marcuzzo e Barros, 2014).



Os dados de precipitação pluviométrica (mm) e radiação global solar incidente – (R_g MJ/m²/dia) sobre a área de estudo, no período de abril de 2019 a agosto de 2020, caracterizam uma representação do cenário ambiental e sua relação com o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar nos talhões, desde o último corte na safra 2019 até a colheita alvo na safra 2020, considerando manejo operacional padrão e colheita mecanizada realizada conforme planejamento prévio para início de safra (abril, maio e junho) e algumas fazendas em meio de safra (julho, agosto, setembro) (Figura 2).

Imagens de satélites

Os satélites Sentinel-2A/2B são uma componente do Programa GMSE (*Global Monitoring for Environment and Security*) coordenado pela agência espacial europeia (ESA). Leva a bordo o sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) que registra imagens com resolução radiométrica de 12 bits por

pixel, resolução espectral de 13 bandas variando no comprimento de ondas radiométricas que contemplam as faixas do espectro visível (360 a 760nm), infravermelho próximo (760 a 1400nm) e infravermelho médio (1400 a 2500nm), sendo disponibilizadas com resolução temporal de 5 dias e resolução espacial de 10m na faixa do espectro visível, 20m na faixa do infravermelho e 60m para as bandas de correção atmosférica.

As imagens Sentinel-2 são caracterizadas como produtos *Open-Data* disponíveis gratuitamente em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Nesse estudo, foram utilizadas imagens órbita/ponto 22KCE Sentinel-2 corrigidas em nível 2A de correção atmosférica e reflectância, calibração geométrica e ortorretificação e também sem nuvens ou névoas sobre os talhões de cana-de-açúcar das fazendas avaliadas no período de 27/12/2019 a 14/06/2020 (Tabela 1).

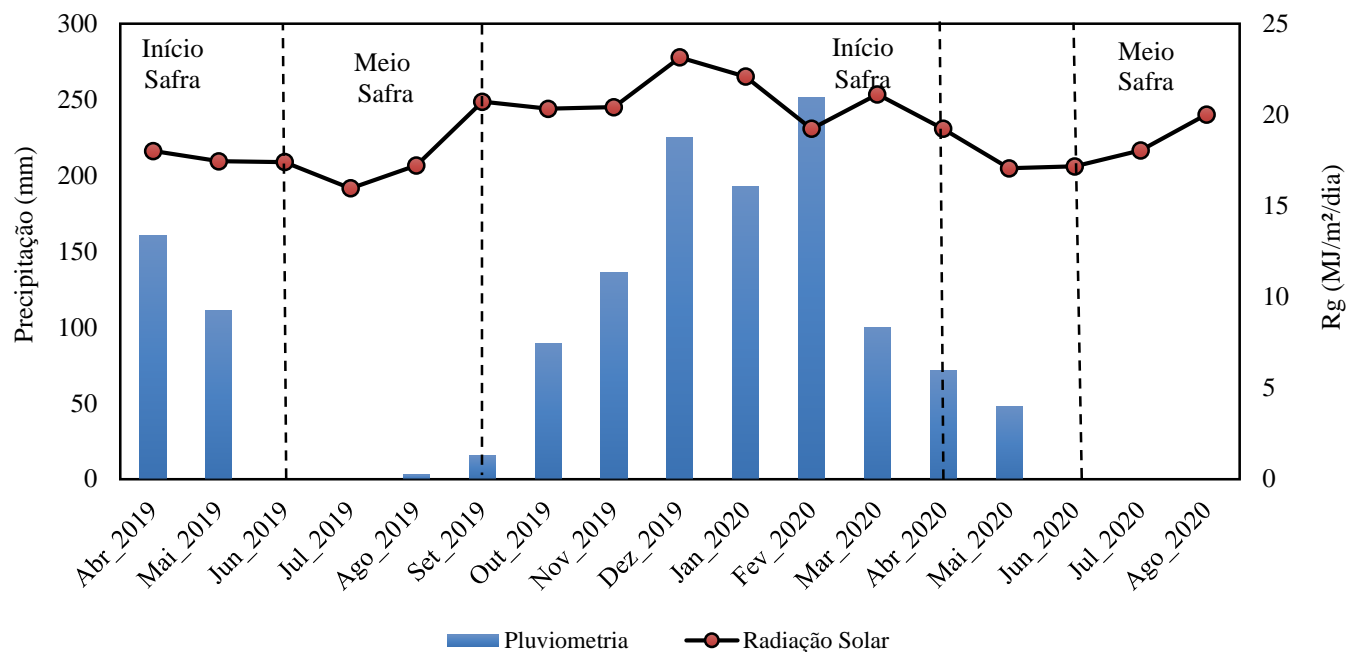


Figura 2. Dados de pluviometria (mensal) e Radiação solar global incidente (Rg) média mensal. Fonte: Estação meteorológica automática A016 (INMET, 2021).

Tabela 1. Imagens Sentinel-2 utilizadas na área de estudo da Usina Energética Serranópolis-GO

Data	Ano 2019					Ano 2020									
	27 dez	16 jan	31 jan	06 mar	31 mar	05 abr	10 abr	20 abr	30 abr	10 mai	20 mai	30 mai	09 jun	14 jun	
Faz 003		X		X	X	X				X	X	X	X	X	
Faz 005		X		X	X	X				X	X	X	X	X	
Faz 007		X		X	X	X				X	X	X	X	X	
Faz 012		X		X	X			X		X	X	X	X	X	
Faz 013			X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 017		X		X	X		X	X		X	X	X	X	X	
Faz 019		X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
Faz 027		X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 030		X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	
Faz 102		X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 105		X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 114		X		X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 116		X		X	X	X		X		X	X	X	X	X	
Faz 118		X		X	X	X		X	X		X	X	X	X	
Faz 123			X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	
Faz 125	X	X		X	X		X		X	X		X	X	X	

O processamento dos índices de vegetação IAF e fAPAR utilizou o *software Open-Source Sentinel Application Platform (SNAP)*, disponível

em: <https://step.esa.int/main/download/snap>. sendo o processamento das imagens realizado utilizando o algoritmo RTM PROSAIL (Figura 3).

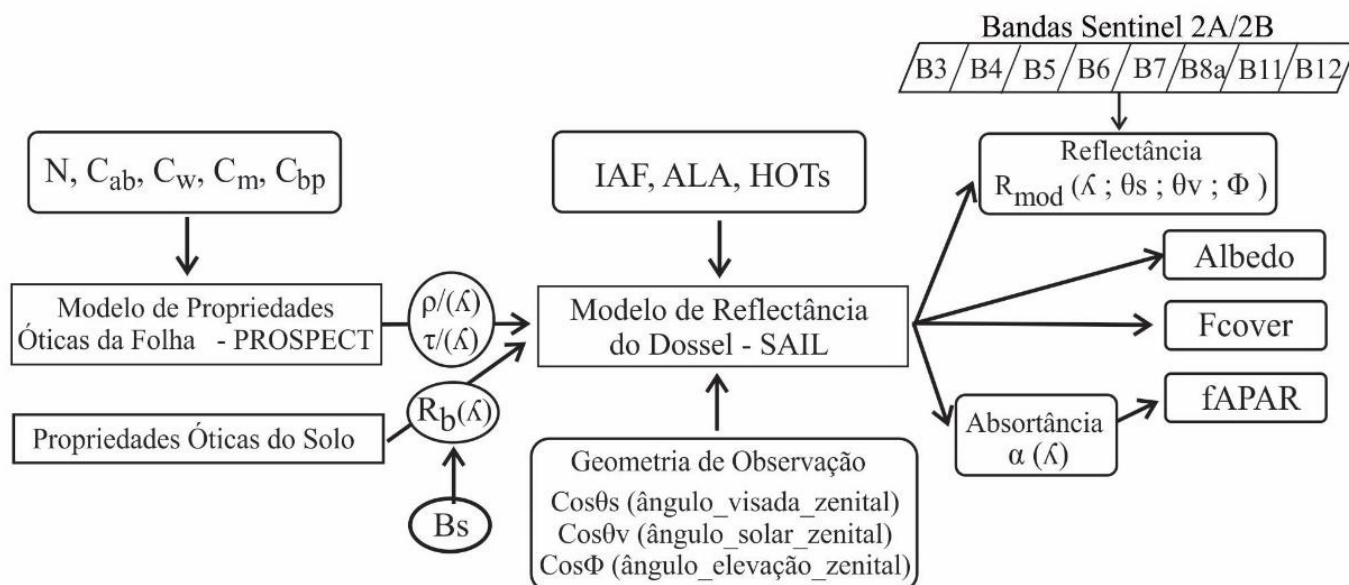


Figura 3. Visão do fluxo de processamento dos dados no RTM PROSAIL/SNAP. Fonte: Weiss e Baret (2016).

O *software Sentinel Application Platform* (SNAP Toolbox) é um programa *Open-Source* desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) para processamento e análise de imagens geradas pelos satélites Sentinel.

O RTM PROSAIL é um algoritmo resultante da combinação do modelo de propriedades ópticas da folha (*Leaf Optical Properties Model* – PROSPECT) com o modelo de transferência de radiação a nível de dossel (*Canopy Bidirectional Reflectance Model* – SAIL) (Jacquemoud et al., 2009).

No RTM PROSAIL, para cada variável biofísica, uma rede neural é calibrada e treinada, composta por um *layer* com 11 dados de entrada normalizados, conjugando 8 bandas espectrais Sentinel-2 MSI, 3 ângulos de visadas e 5 neurônios com funções de transferência sigmoideal.

As oito bandas espectrais utilizadas simultaneamente pelo algoritmo RTM PROSAIL (B3 560nm, B4-665nm, B5-705nm, B6-740nm, B7-783nm, B8a-865nm, B11-1610nm e B12-2190nm) propiciam uma análise da intensidade de resposta espectro-morfofisiológica do *status* da cana-de-açúcar numa amplitude espectral de 560 a 2190nm.

Procedimento metodológico

Nesse estudo, a parametrização dos dados de entrada no agro-modelo metodológico para orientar a estimativa de rendimento em TCH considerou o ciclo

de desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorrendo em quatro estádios fenológicos: i) Brotação/Rebrota – 20 a 60 dias; ii) perfilhamento: 60 dias até 150 dias; iii) crescimento e alongamento de colmos: 150 até 240 dias, período responsável pelo acúmulo de cerca de 75% da matéria-seca total; e iv) maturação dos colmos: 240 a 360 dias, momento em que ocorre redução nas taxas de crescimento da planta e aumento no acúmulo de sacarose nos colmos (Naandanjain, 2013).

As atividades do processo metodológico (Figura 4) foram estruturadas com base nos conceitos de eficiência do uso da radiação (EUR) pelas plantas para produção de fotoassimilados, considerando a resposta espectro-morfofisiológica a nível de dossel dos blocos de cultivares de cana-de-açúcar, normalizada pela série temporal de valores IAF e fAPAR extraídos de imagens Sentinel-2, nos estádios fenológicos de crescimento e alongamento de colmos e maturação de colmos.

A experimentação e validação do agro-modelo metodológico de estimativa de rendimento de colmos apoiado em dados IAF e fAPAR, utilizou como referência os dados reais de rendimento agrônomo (TCH) dos talhões de cana-de-açúcar obtidos mediante colheita mecanizada padrão realizada pela Usina Energética Serranópolis-Goiás na safra 2021.

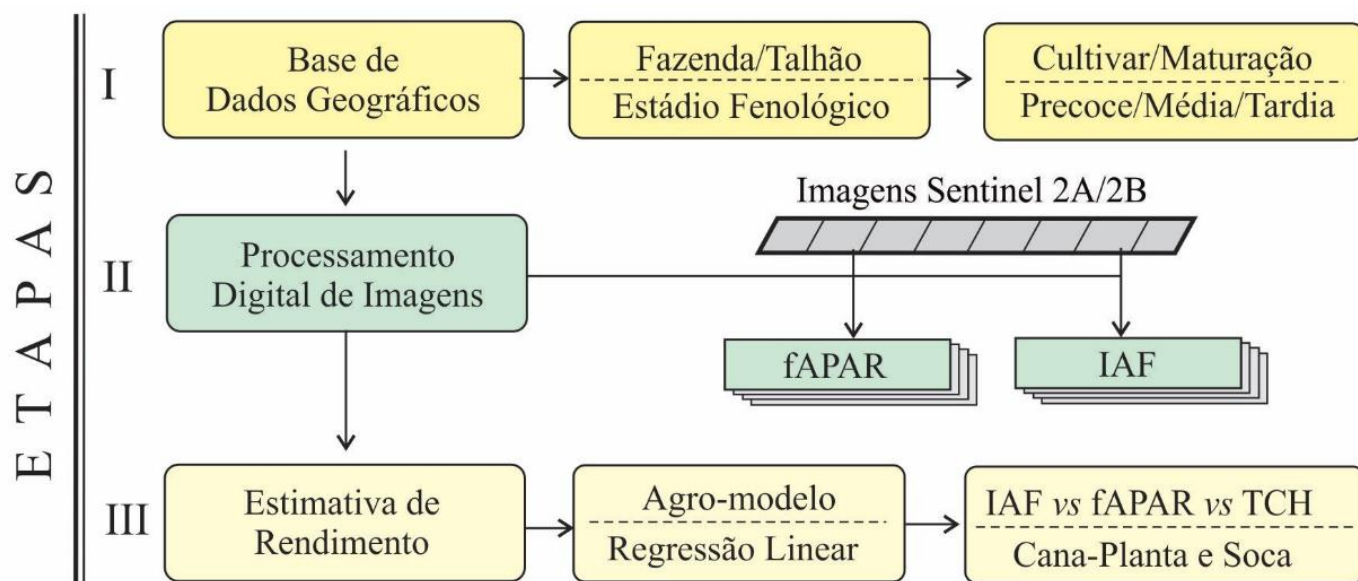


Figura 4. Fluxograma de atividades – Esquema conceitual da Modelagem metodológica para estimativa de rendimento de colmos de cana-de-açúcar (TCH)

Na etapa I, foi estruturada a base de dados vetorial (*shapefile*), criando máscaras para definir o espaço geográfico dos blocos de talhões de cultivares de cana-de-açúcar, sistematização dos atributos não espaciais (ciclo de maturação, número de cortes, etc.) e realização do *download* da série temporal de imagens Sentinel-2.

Na etapa II, foi realizada a reamostragem dos pixels das imagens Sentinel-2 para resolução espacial de saída igual a 10 m e processado a série de índices biofísicos, utilizando o algoritmo RTM PROSAIL para obtenção dos valores médios dos índices (IAF e fAPAR) dentro do espaço geográfico definido pelas máscaras vetoriais, gerando dados referentes a nove avaliações individualizadas sobre cada bloco de cultivares de cana-de-açúcar nas fazendas da área de estudo.

Na etapa III, foi estruturado o agro-modelo de regressão linear múltipla que estabelece a relação funcional entre dados biofísicos da vegetação (IAF e fAPAR) e rendimento agrônomo da cana-de-açúcar (TCH) através da Equação (1).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Em que: y é a variável dependente (resposta), caracterizada pela produtividade de colmos viáveis para a indústria sucroenergética (TCH); x_1, x_2, \dots, x_k são variáveis independentes (IAF = x_1 e fAPAR = x_2); β_0, \dots, β_k são parâmetros a serem estimados e

ε é o erro aleatório referente a variabilidade em y que não pode ser explicada pelas variáveis independentes.

Além de métricas estatísticas para orientar a análise de correlação entre as variáveis independentes (IAF = x_1 e fAPAR = x_2) e a variável resposta no agro-modelo para estimativa de rendimento de colmos na cana-de-açúcar ($y = TCH$) foi utilizado técnica de krigagem para construção do modelo de superfície de resposta 3D, ampliando a interpretação do entendimento da autorrelação entre as variáveis.

A krigagem é uma técnica de interpolação da geoestatística que leva em consideração as características da autocorrelação de variáveis que possuem dependência espacial dos eixos cartesianos com coordenadas (X, Y e Z), permitindo que os dados obtidos por amostragem de pontos específicos sejam utilizados para parametrizar a estimativa de novos pontos, nos quais o valor da variável é desconhecido (Hengl, 2009).

De acordo com Scarpare (2011), a produtividade da cana-de-açúcar é diretamente proporcional à produção de biomassa, razão pela qual o IAF é um dos principais parâmetros de entrada nos modelos de predição de safra, uma vez que o IAF representa a superfície foliar fotossinteticamente ativa e o sítio de absorção de radiação solar através dos cloroplastos.

Portanto, corroborando com a teoria de Monteith (1972) quando afirma que em plantas sadias, supridas de água e nutrientes, a quantidade de carbono fixado pela fotossíntese é proporcional ao

montante de radiação solar absorvida (RSA MJ/m²/dia) multiplicada pela eficiência do uso da radiação (EUR).

A RSA (MJ/m²/dia) representa o montante de energia solar absorvida pelas folhas da vegetação para realização da fotossíntese, sendo esta energia função do produto da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR) pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente na região do estudo.

Por conseguinte, a quantidade de fitoenergia absorvida pela planta de cana-de-açúcar durante um determinado período de tempo em que a cultura permanece no campo, representa a eficiência potencial do uso da energia solar pelo cultivar de cana-de-açúcar para realizar fotossíntese e simultaneamente sequestrar o dióxido de carbono atmosférico (CO₂) para fixar o carbono (C) na parede celular da cana-de-açúcar e incrementando a produção primária bruta e também produzir sacarose (açúcar).

Nesse contexto, onde o índice fAPAR representa o percentual de radiação solar absorvida pelas plantas para produção de fotoassimilados e o IAF caracteriza-se como o aparato foliar que intercepta e absorve a radiação solar utilizada na fotossíntese. O uso destes dados como parâmetros de entrada na modelagem da estimativa de produção primária bruta tem correlação direta com rendimento de colmos de cana-de-açúcar (TCH), considerando as Equações (2 e 3) adaptadas de Kumar e Monteith (1981).

$$TCH = (fAPAR \times RFA) \times EUR \quad (2)$$

$$RSA = fAPAR \times RFA \quad (3)$$

Em que: TCH – Tonelada de Colmos por Hectare; EUR – Eficiência do Uso da Radiação; Rg - Radiação solar global incidente; fAPAR - Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida; RSA – Radiação Solar Absorvida; e RFA – Radiação Fotossinteticamente Ativa. Diante da ausência de medições RFA na região, foi utilizado RFA como sendo 45% da Rg) (Running e Zhao, 2015).

Análise estatística multivariada

As análises da concordância entre dados fAPAR e IAF obtidos mediante processamento de imagens Sentinel-2 e dados de rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar obtidos através do relatório anual de colheita mecanizada, padrão Energética Serranópolis – Goiás e também dados secundários derivados de processamentos tais como, radiação solar absorvida (RSA MJ/m²) e estimativa de taxa de eficiência do uso da radiação pelos cultivares, utilizou como referência quali-quantitativa as métricas estatísticas calculadas considerando a variância (ANOVA) a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) e (R² - Coeficiente de determinação ajustado e RMSE – Raiz quadrada do erro médio). Ambos orientados para determinar a significância estatística das hipóteses.

Os dados com a finalidade de obtenção das resultantes estatísticas foram processados utilizando o software estatístico *Open-Source* JASP versão 0.16.3. Disponível em: <https://jasp-stats.org>.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Agro-modelo metodológico de estimativa de rendimento de colmos

A experimentação e validação do agro-modelo de estimativa de rendimento da cana-de-açúcar em Tonelada de Colmos por Hectare (TCH) apresentado, neste estudo desenvolvido na Usina Energética Serranópolis-Goiás teve abrangência nos municípios goianos de Aporé e Serranópolis e integrou um universo amostral de dados que representa canaviais cultivados em 16 fazendas localizadas em distintos ambientes edáficos de produção, 125 talhões comerciais de cana-de-açúcar com *status* de cortes no ciclo de produção variando entre cana-planta (1º corte) até cana-soca de 13º corte e 3 diferentes cultivares.

A Tabela 2 apresenta a coletânea de dados biofísicos (IAF e fAPAR) considerando o somatório dos valores referentes a nove avaliações sobre cada fazenda e dados de rendimento médio (TCH) obtido mediante relatório de colheita mecanizada pela Usina Energética Serranópolis-Goiás.

Tabela 2. Dados IAF, fAPAR e RSA (acumulado de 9 avaliações) e TCH (média/fazenda/bloco de talhões) na Safra 2020 – Usina Energética Serranópolis – Goiás.

Fazenda	Área (ha)	Cultivar	Nº Corte	ΣIAF	ΣfAPAR	TCH	ΣRSA (MJ/m ²)	EUR
123	240,45	RB867515	1	14,80	6,49	109,29	62,24	1,756
005	45,62	RB867515	2	11,24	6,63	109,93	63,98	1,718
003	230,21	RB867515	2	21,17	6,34	102,58	61,59	1,666
019	54,23	RB867515	2	13,74	6,09	91,93	59,24	1,552
125	208,72	RB867515	1	14,15	6,26	94,39	64,23	1,470
017	204,19	RB867515	4	15,09	6,02	84,75	58,02	1,461
007	175,61	CVSP7870	2	18,99	6,02	82,85	58,08	1,426
118	133,69	RB867515	3	20,69	5,64	74,26	53,43	1,390
013	104,42	CVSP7870	4	18,94	5,42	67,83	51,95	1,306
030	190,39	RB867515	3	13,82	5,42	68,33	52,41	1,304
019	158,29	RB867515	13	18,07	5,27	62,46	51,03	1,224
013	362,8	RB867515	6	18,04	5,15	59,33	49,23	1,205
012	87,69	CTC17	6	17,78	5,41	60,87	51,46	1,183
114	89,84	RB867515	6	12,89	5,46	61,72	53,11	1,162
027	220,53	RB867515	7	14,35	5,11	55,53	50,06	1,109
116	194,59	MIX	6	13,56	4,97	51,91	47,63	1,090
102	194,66	RB867515	6	15,24	5,33	56,22	52,10	1,079
105	115,64	RB867515	4	17,20	5,90	53,11	57,65	0,921
Média				16,10	5,72	74,85	55,41	1,33
Desvio Padrão				2,75	0,50	19,14	5,13	0,23
Coeficiente de Variação (%)				17,10	8,66	25,57	9,25	17,29

Fonte: Imagem Sentinel-2 (2019/2020); Relatório - Usina Energética Safra Agrícola (2020).

A interpretação dos dados reportados da Tabela 3, baseado no montante de radiação solar absorvida (Σ RSA MJ/m²) pela cana-de-açúcar, apresenta um ranqueamento de rendimento em Toneladas de Colmos por Hectare (TCH) diretamente relacionados aos maiores valores acumulados IAF e fAPAR obtidos sobre cada bloco de cultivares durante o tempo de permanência da cultura no campo.

Assim sendo, o bloco de cultivares de cana-de-açúcar da Fazenda 123 (Cultivar RB867515) em primeiro corte, se posiciona no topo do ranqueamento como sendo mais eficiente no uso da radiação solar produzindo 1,756 TCH para cada 1,0 MJ/m² de radiação absorvida, enquanto a Fazenda 105 no quarto corte (Cultivar RB867515) representa a última colocação, produzindo 0,921 TCH para cada 1,0 MJ/m² de radiação solar absorvida.

Portanto, a análise dos dados aponta a existência de uma relação entre rendimento de colmos de cana-de-açúcar (TCH) e quantidade de Radiação Solar Absorvida (RSA MJ/m²/dia) pelas plantas. Sendo o rendimento e a radiação absorvida diretamente associados a genética do cultivar,

ambiente edáfico (fertilidade e textura e biologia do solo), considerando manejo padrão-usina.

Nesse contexto de estimativa da produtividade dos cultivares de cana-de-açúcar (TCH) baseado EUR, considerando a influência da idade do canavial mediante o número de cortes no ciclo de produção da cultura, à exceção da Fazenda 017 em quarto corte, com 6º melhor rendimento em meio a canaviais mais jovens (1 e 2 cortes), pode estar relacionado ao ambiente edáfico dessa fazenda, classificado como Latossolos Vermelho-Amarelos, enquanto nas demais fazendas avaliadas, o solo é classificado como Neossolos Quartzarênicos.

A simulação da produtividade agrônômica e industrial da cana-de-açúcar, com grau aceitável de acurácia e praticidade, depende de uma combinação de diferentes fatores: climáticos, edáficos, agrônômicos e manejo (Hammer et al., 2019).

Neste sentido, os valores reportando a intensidade de resposta espectral obtidos pelos índices biofísicos IAF e fAPAR processados utilizando o algoritmo RTM PROSAIL reúnem predicados que asseguram existência de estreita

relação com a atividade fotossintética e processamentos metabólicos da vegetação, uma vez que conjuga simultaneamente oito bandas espectrais integrando informações morfofisiológicas inerentes as faixas eletromagnética do visível e *red edge* (concentração de clorofilas a e b), infravermelho próximo (biomassa e estrutura da planta) e infravermelho médio (conteúdo de água no dossel).

Portanto, caracterizando os índices biofísicos IAF e fAPAR como ferramentas que apresentam através da intensidade de resposta espectro-

morfofisiológica, um valor numérico de alta correlação com a eficiência do uso da radiação para produção de fotoassimilados pela vegetação.

Na perspectiva de estruturação de um agromodelo de previsão de rendimento de colmos de cana-de-açúcar, o estudo utilizou os dados da Tabela 3 para avaliar através de análise de regressão linear simples, a influência do montante acumulados IAF e fAPAR no rendimento agrônômico da cana-de-açúcar (TCH) (Figura 5).

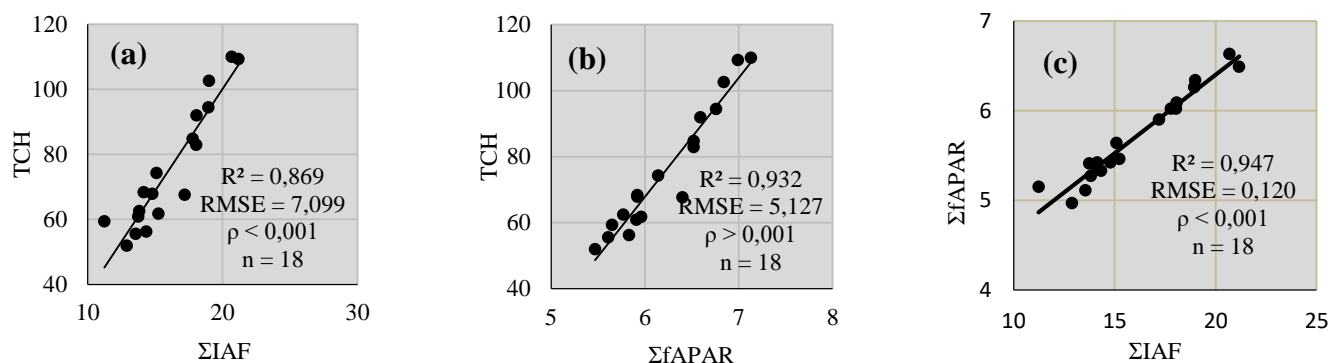


Figura 5. Análise de correlações entre os parâmetros: ΣIAF e TCH (a); ΣfAPAR e TCH (b) e ΣIAF e ΣfAPAR obtidos na área de estudo em cana-de-açúcar na Usina Energética Serranópolis - Goiás.

A interpretação das métricas estatísticas reportadas na Figura 5, assegura através dos coeficientes de determinação (R^2), a existência de robusta correlação entre os valores IAF e fAPAR e o rendimento de colmos da cana-de-açúcar (TCH). Os primeiros obtidos através de processamento de imagens Sentinel-2 e o último mediante colheita mecanizada.

No contexto da modelagem para estimar rendimento de colmos, o Coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,932$) obtido entre a correlação dos parâmetros ΣfAPAR e TCH no estudo realizado na Usina Energética Serranópolis-Goiás, foi similar ao coeficiente de determinação ($R^2 = 0,923$) obtido por Cruz et al., (2017) em experimento realizado para estimar produtividade (TCH) utilizando série temporal de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) extraídos de imagens Landsat7 ETM+ sobre 23 talhões de cana-de-açúcar na região de Morelos – México.

Além disso, os Coeficientes de determinação (R^2 variando entre 0,87 e 0,93) e Raiz quadrada do erro médio (RMSE variando entre 7,10 e 5,13) obtidos no experimento da Usina Energética

Serranópolis-Goiás são qualitativamente superiores as métricas ($R^2 = 0,51$ a $0,60$ e $RMSE = 32,4$ a $36,1$) obtidas por Dimov et al. (2022) em Metahara Sugar Estate – Etiópia, utilizando série temporal de imagens Sentinel-2 e índices de vegetação: (*Normalized Difference Vegetation Index*), (*Normalized Difference Red Edge 1*) e (*Chlorophyll Index Red Edge*).

As métricas estatísticas obtidas nos modelos de regressão linear simples obtidas no estudo de cana-de-açúcar realizado na Energética Serranópolis-Goiás também foram superiores às obtidas por Muller et al. (2020), usando dados fAPAR derivados de imagens Landsat-8 (*Operational Land Image*) como variável de entrada em modelos lineares para estimar produtividade da cana-de-açúcar em estudos realizados sobre 40 talhões nas regiões de Pongola e Sezela, na África do Sul, onde obteve RMSE variando entre 8,35 e 13,95 (TCH).

Ressalta-se que as métricas estatísticas obtidas na área de estudo da Usina Energética Serranópolis-Goiás, também foram superiores as métricas obtidas nos estudos realizados na cana-de-açúcar por Fernandes et al. (2017), utilizando série

temporal de valores NDVI (2003 a 2012), extraídas de imagens do satélite MODIS e processados com apoio de rede neural, obtendo estimativa de rendimento de RMSE = 6,8% em relação ao TCH e $R^2 = 0,61$, tendo como amostras 60 municípios canavieiros no estado de São Paulo – Brasil.

No que concerne ao agro-modelo de estimativa de rendimento de colmos de cana-de-açúcar, a análise de concordância entre as variáveis independentes IAF e fAPAR (X_1 , X_2) e a variável

resposta ($Y = TCH$), foi delineada utilizando regressão linear múltipla baseada em métodos estatísticos clássicos (Equação 4), complementados pela construção do Modelo de Superfície de Resposta 3D estruturado com base no processamento do conjunto de pontos cartesianos (X_1 , X_2 , Y) da Tabela 3 e interpolador geoestatístico denominado krigagem para ilustrar de forma gráfica a autocorrelação entre as variáveis do agro-modelo Figura 6.

Tabela 3. Superfície de resposta para o TCH em função das variáveis x_1 (IAF) e x_2 (fAPAR) cana-de-açúcar na Safra 2020 – Usina Energética Serranópolis – Goiás.

Fazenda	Σ IAF	Σ fAPAR	TCH
123	14,80	6,49	109,29
005	11,24	6,63	109,93
003	21,17	6,34	102,58
019	13,74	6,09	91,93
125	14,15	6,26	94,39
017	15,09	6,02	84,75
007	18,99	6,02	82,85
118	20,69	5,64	74,26
029	18,94	5,42	67,83
030	13,82	5,42	68,33
019	18,07	5,27	62,46
013	18,04	5,15	59,33
012	17,78	5,41	60,87
114	12,89	5,46	61,72
027	14,35	5,11	55,53
116	13,56	4,97	51,91
102	15,24	5,33	56,22
105	17,20	5,90	53,11
Média	16,10	5,72	74,85
Desvio Padrão	2,75	0,50	19,14
Coefficiente de Variação	17,10	8,66	25,57

$$(eq. 4) \quad y = 1,137x_1 + 29,806x_2 - 113,098$$

$$R^2 = 0,912 \quad RMSE = 5,649 \quad \rho < 0,001$$

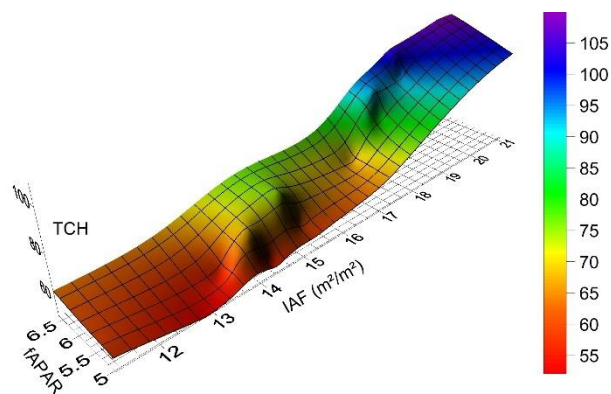


Figura 6. Modelo tridimensional ajustado mostrando a correlação entre os valores Σ IAF e Σ fAPAR versus TCH da cana-de-açúcar na safra agrícola 2020 na área de estudo – Usina Energética Serranópolis – Goiás.

A interpretação das métricas estatísticas obtidas pelo processamento da equação de regressão linear múltipla utilizando os dados da Tabela 3 como variáveis, assegurou a existência de alta correlação entre dados biofísicos da cultura (Σ IAF e Σ fAPAR) e o rendimento agrônomo de cana-de-açúcar, expresso em TCH.

Neste sentido, a análise de variância dos dados com base na interpretação da Figura 6 construída através dos parâmetros (Σ IAF, Σ fAPAR e TCH)

estruturados como conjunto de pontos cartesianos (X_1 , X_2 , Y), processados utilizando o interpolador geoestatístico krigagem reporta através do coeficiente de determinação ajustado $R^2 = 0,91$ que 91,2% da variância foram explicados pelas variáveis independentes.

Por outro lado, a interpretação visual do plano de superfície de resposta do modelo 3D (Figura 6) aponta um gradiente de linearidade positiva crescente a partir dos dados (Σ IAF, Σ fAPAR e TCH)

posicionando as fazendas com valores mais baixos na base do agro-modelo e no topo, as fazendas com maiores rendimentos em TCH e, conseqüentemente, maiores valores de IAF e fAPAR representando os valores acumulados durante a safra 2021.

CONCLUSÃO

O presente estudo obteve métricas estatísticas robustas que sugerem a eficiência das variáveis e operacionalidade do modelo.

Outro aspecto importante observado neste estudo sobre a cana-de-açúcar é o potencial da combinação das geotecnologias *Open Data* (Sentinel-2) e *softwares Open Sources* (SNAP e JASP) na geração de geoinformações no apoio a tomadas de decisões no âmbito da produção agrícola canavieira em escala regional.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Usina Energética Serranópolis-Goiás pela disponibilidade de dados agroindustriais de colheita da cana-de-açúcar e suporte logístico durante a execução do experimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, M.R.D.; Marcuzzo, F.F.N.; Barros, J.R. (2014). Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**. 8(16): 40-55. DOI: 10.5654/actageo2014.0004.0016

Cardozo, N.P.; Sentelhas, P.C.; Panosso, A.R.; Palhares, A.L.; Ide, B.Y. (2015) Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, Lisse. 59(12): 1913–1925.

Cruz, Z.G.A.; Alberto, G.; Vélez, E.P.; Chávez, L.T.; Magdaleno, H.F. (2017). Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**. México-ME, 8 (7): 1575–1586, DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.513>

Danelichen, V.H. de M.; Velasque, M.C.S.; Musis, C.R.; Machado, N.G.; Nogueira, J. de S.; Biudes, M.S. (2014). Estimativas de índice de área foliar de

uma pastagem por sensoriamento remoto no Pantanal Mato-grossense. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM Ciência e Natura**. Santa Maria, 36 (3): 373 – 384. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X13168>

Dimov, D. Uhl, J.H.; Löw, F.; Seboka, G.N. (2022). Sugarcane yield estimation through remote sensing time series and phenology metrics. **Smart Agricultural Technology**. 2: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100046>

Dourado-Neto, D.; Teruel, D.A.; Reichardt, K.; Nielsen, D.R.; Frizzone, J.A.; Bacchi, O.O.S. (1998). Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**. 55: 46-50. DOI: doi.org/10.1590/S0103-90161998000500008

ENERGÉTICA SERRANÓPOLIS. (2019/2020). PRCL-029 - Relatório de colheita da safra agrícola. 2020. Relatório Final.

Fernandes, J.L.; Ebecken, N.F.F.; Esquerdo, J.C.D.M. (2017). Sugarcane yield prediction using time series and neuralnetworks ensemble. **International Journal of Remote Sensing**. 38 (16): 4631-4644. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1325531>

Finch, D.A.; Bailey, W.G.; McArthur, L.J.; Nasitwitwi, B.M. (2004). Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, 122 (3-4): 229–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.09.015>

Gunarathana, M.H.J.P.; Sakai K.; Nakandakari T.; Momii K.; Kumari M.K.N. (2019). Sensitivity analysis of plant and cultivar specific parameters of APSIM sugar model: variation between climates and management conditions. **Agronomy**. 9(5): 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.09.015>

Hammer, R.G.; Sentelhas, P.C.; Mariano, J.C.Q. (2019). Sugarcane yield prediction through data mining and crop simulation models. **Sugar Tech**. 22(2): 216-225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00776-z>

- Hengl, T. (2009). A practical guide to geostatistical mapping. 2.ed. Amsterdam, University of Amsterdam. 291p.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 set. 2021
- Jacquemoud, S.; Verhoef, W.; Baret, F.; Bacour, C.; Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P.; François, C., Ustin, S.L. (2009). PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. **Remote Sensing of Environment**. 113(1): 56–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026>
- Kumar, M.; Monteith, J.L. (1981). Remote sensing of crop growth. In: Smith H. editor. Plants and the daylight spectrum. Londres: Academic Press. P.133-144.
- Marin, F.R.; Jones, J.W. (2014) Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola, Piracicaba** .71(1): 1-16.
- Monteith, J. L. (1972) Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**. (9): 747-766. DOI: <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Muller, S.J. ; Sithole, P.; Singels, A.; Niekerk, A.V. (2020). Assessing the fidelity of Landsat-based fAPAR models in two diverse sugarcane growing regions. **Computers and Electronics in Agriculture**. 23(87): 124-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105248>
- Naandanjain (2013). Irrigation Ltd. *Sugar Cane*; Technical Report; NaanDanJain Irrigation Ltd.: Post Naan, Israel.
- Running, S.W.; Zhao, M. (2015). 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.
- Scarpate, E. F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. (2011). Tese (Doutorado em ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. p164.
- Shelestov A.; Kolotii A.; Camacho F.; Skakun S.; Kussul O.; Lavreniuk M. (2015). 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, 26–31.
- Watt, D.A.; McCormick, A.J.; Cramer, M.D (2014). Source and Sink Physiology. In: Moore, P.H.; Botha, F.C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. Oxford: Willey Blackwell, p.483-520. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch18>
- Weiss, M.; Baret, F. (2016). **2ToolBox Level 2 products: LAI, fAPAR, FCOVER**. v.1.1, [s.n.]. 53p. Apostila.