



Predição da produtividade de cana-de-açúcar com base em modelo agrometeorológico no semiárido brasileiro

Anderson Santos da SILVA^{1*}, Geber Barbosa de Albuquerque MOURA², Fabrício Marcos Oliveira LOPES², Miguel Julio Machado GUIMARÃES³, Alan Cezar BEZERRA⁴, Anthony Wellington Almeida GOMES¹

¹Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, PE, Brasil.

²Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Raimundo das Mangabeiras, MA, Brasil.

⁴Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, PE, Brasil.

*e-mail: anderson.silva@ufape.edu.br

(ORCID: 0000-0002-2229501X; 0000-0001-9073-8145; 0000-0002-8268-747X; 0000-0002-5497-6442; 0000-0002-9986-9464; 0000-0002-1397-7035)

Submetido em 01/05/2022; Aceito em 07/11/2022; Publicado em 22/11/2022.

RESUMO: A predição da produtividade de cultivos de cana-de-açúcar é fundamental para o planejamento logístico dos produtores. No entanto, muitas propriedades recorrem a estimativa visual de produtividades em áreas canavieiras, o que, muitas vezes, geram dados tendencioso que não refletem a real produtividade dos cultivos. Objetivou-se construir um modelo de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar na região do semiárido nordestino. Foram utilizados dados anuais de rendimento agrícola (safras 2005/2006 a 2011/2012) e agrometeorológicos mensais (2005 a 2012). Para a calibração do modelo, a escolha das variáveis independentes foi analisada mediante a correlação existente dos dados agrometeorológicos e de rendimento, logo em seguida foi construída a regressão linear múltipla para estimar a produtividade da cana-de-açúcar. As variáveis independentes selecionadas para o modelo foram a irrigação mais precipitação pluvial, a temperatura média do ar, o déficit de saturação de vapor do ar e o fotoperíodo. No período da calibração, as regressões lineares múltiplas apresentaram resultados satisfatórios com diferença relativa média inferior a 3% e um erro padrão de estimativa de 2,7264 toneladas de cana em todos os anos-safras analisados. Na validação do modelo agrometeorológico, o melhor desempenho foi obtido no ano-safra de 2004/2005 quando comparado com os anos-safras de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente, período que houve a renovação de plantio. Mediante o uso de um fator de correção, o modelo agrometeorológico obteve um ajuste nos anos-safras de 2013/2014 e 2014/2015 melhorando seu desempenho. Características como baixo custo, facilidade de executar e precisão tornam as regressões lineares múltiplas como excelentes ferramentas.

Palavras-chave: precipitação; *Saccharum officinarum*; modelagem; agrometeorologia.

Sugarcane yield prediction based on agrometeorological model in the Brazilian semi-arid

ABSTRACT: The prediction of the productivity of sugarcane crops is essential for the logistical planning of producers. However, many properties resort to visual estimates of yields in sugarcane areas, which often generate biased data that do not reflect the real productivity of crops. This study aimed to build a multiple linear regression model to estimate productivity of sugarcane in the northeastern semi-arid region. Annual data of agricultural income were used (harvest 2005/2006 to 2011/2012) and monthly agro-meteorological data (2005-2012). For the model calibration period, the choice of the independent variable of the regression was analyzed by correlation of crop weather data and output data then were defined variables and constructed linear regression to estimate the yield of sugar cane -sugar. The independent variables selected for the model were irrigation more rainfall, average air temperature, the vapor saturation deficit of the air and the photoperiod. At the calibration period, the multiple linear regressions showed satisfactory results with average relative difference of less than 3%, and a standard error of estimate of 2.7264 tons of sugarcane in all crop years analyzed. Validation of the agro-meteorological model, the best performance was obtained in crop year 2004/2005 compared to the crop years of 2013/2014 and 2014/2015, respectively, a period that was renewed planting. By using a correction factor, the agro-meteorological model obtained an adjustment in crop years of 2013/2014 and 2014/2015 improving its performance. Features such as low cost, easy to implement and precision make the multiple linear regressions as an excellent tool.

Keywords: precipitation; *Saccharum officinarum*; modeling; agrometeorology.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor atual de cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.) do mundo (FAO, 2019), sendo a matéria-prima para a produção de etanol e açúcar. Para safra

2021/2022, estima-se uma área total de 8.317,3 mil hectares, uma produtividade média de 70,357 t ha⁻¹ e uma produção total de 585.179,4 mil toneladas, destes a região nordeste é responsável por 847,4 mil hectares, 60,260 t ha⁻¹ e 51.062,1

mil toneladas, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022).

Segundo a CONAB (2022), a região Sudeste destaca-se com a maior produção de cana-de-açúcar no Brasil, com aproximadamente 366.929,9 mil toneladas, em seguida o Centro-oeste com 131.370,3 mil toneladas. A região Nordeste ocupa a terceira colocação no ranking, com uma produção estimada em torno de 51.062,1 mil toneladas, seguido da região Sul com 31.961,6 mil toneladas e finalizando, a região Norte, com aproximadamente 3.855,5 mil toneladas.

No Nordeste, os principais estados produtores são Alagoas e Pernambuco, seguido pela Paraíba e Bahia. A cana-de-açúcar vem sendo cultivada em boa parte do semiárido brasileiro uma vez que a cultura apresenta alta produção de biomassa, como resposta ao clima local e à utilização de tecnologias de irrigação no sistema de produção (SILVA et al., 2011). Portanto, é uma cultura de expressiva importância na economia regional, necessitando de ferramentas que possam aumentar sua produtividade, produtividade esta que depende de uma combinação de diferentes fatores, a saber: climáticos, edáficos, agrônômicos e manejo (HAMMER et al., 2019).

A predição da produtividade dos cultivos é fundamental tanto no planejamento do poder público quanto dos produtores, que podem reduzir custos, melhorar a logística de colheita com um melhor gerenciamento da produtividade (LUCIANO et al., 2021). Contudo, muitas propriedades recorrem a estimativa visual de produtividades em áreas canavieiras por técnicos com base na experiência adquirida e em informações de safras anteriores; assim, esse tipo de análise pode ser tendencioso, e depende, exclusivamente, da experiência do técnico que irá avaliar o talhão, não permitindo averiguar os erros envolvidos.

Há alguns modelos que utilizam diferentes variáveis como solo, agrônômicas e meteorológicas que apresentam ótimos resultados na estimativa, como CANEGRO, CANESIM e APSIM (CARVALHO et al., 2018; GUNARATHNA et al., 2019). Ainda dentro dos diferentes fatores que afetam a produtividade, os climáticos são os únicos imprevisíveis e seus efeitos ao longo dos estágios de desenvolvimento afetam a produtividade final, com isso, modelos de estimativas de produtividades a partir destes fatores podem ser utilizados (VERMA et al., 2021).

Entre as técnicas para estimativa de modelos, a regressão múltipla com as variáveis meteorológicas pode proporcionar a quantificação e simulação da produtividade agrícola, com grau aceitável de acurácia e praticidade (MARCARI, 2015). Através de dados climáticos VERMA et al. (2021) conseguiram ajustar modelos de predição satisfatórios com base na temperatura máxima e mínima, precipitação e tempo na plantação de primavera e outono em um distrito na Índia. Contudo, não há estudos dessa característica na região do semiárido brasileiro.

A origem dos dados é um importante fator na preparação dos modelos. Buscando consolidar um modelo simples, baseado nas variáveis agrometeorológicas em função das condições agrônômicas adequadas encontradas na unidade de produção, é possível obter com precisão e mitigação de riscos a produtividade estimada corroborando com Monteiro; Sentelhas (2017).

A hipótese deste estudo considera que um modelo baseado em variáveis agrometeorológicas permitem estimar a produtividade da cana-de-açúcar em uma unidade de

produção localizada no semiárido. Então, o objetivo deste trabalho foi construir um modelo de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar na região do semiárido nordestino a partir de variáveis agrometeorológicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma propriedade comercial de cana-de-açúcar situada no semiárido baiano, no município de Juazeiro – BA. A área de estudo estava composta por 11 lotes com área total de 131,06 hectares, dos quais 121,50 hectares plantados com cana-de-açúcar, 9,34 hectares de ruas e drenos mais 0,22 hectare de pedras. A área de estudo apresentou o mesmo: tipo de solo (vertissolo); o sistema de irrigação por gotejamento, espaçamento (0,90 m x 2,10 m), variedade cultivada (SP 79-1011) e o tipo de colheita foi manual. Nas safras a partir de 2014 após uma renovação do plantio desse campo, foram plantados em 93% dessa área, a variedade VAT 90-212 e os 7% restantes compostos de várias outras variedades.

2.2. Base de dados de produtividade e meteorológicas

Foram utilizados dados de produtividade fornecidos pela propriedade para as safras de 2005/2006 até 2011/2012 (período de calibração dos modelos) e dos anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015 (período de validação dos modelos). Na Tabela 1 segue o histórico de produtividade da área em estudo, desde a primeira colheita na safra de 1998/1999 até a última colheita, no ano-safra de 2011/2012, além do período de renovação de plantio com nova variedade ocorrida na safra 2012/2013 com a primeira colheita (cana planta) na safra de 2013/2014 e com a segunda colheita (cana soca) no ano-safra de 2014/2015.

As variáveis meteorológicas foram coletadas por uma estação agrometeorológica automática instalada próxima a área experimental (09°19'S e 40°11'W), pertencente à Embrapa Semiárido. Foram utilizadas as variáveis meteorológicas: temperatura média do ar (°C); umidade relativa média do ar (%); insolação (horas dia⁻¹); radiação solar (W m⁻²), precipitação pluvial (mm dia⁻¹) e evapotranspiração (mm dia⁻¹); além desses dados foram utilizados dados da lâmina de irrigação (este último obtido na propriedade).

Os dados meteorológicos foram tabulados em planilha eletrônica e posteriormente submetidos a análise de correlação para verificar a influência significativa dessas variáveis na produtividade final da cultura da cana-de-açúcar. Os testes de todas as variáveis independentes correlacionadas com a produtividade agrícola (variável dependente) foram condicionados à significância do modelo (coeficientes de determinação e correlação), à probabilidade ≤ a 5% e ao erro padrão de estimativa baixo.

2.3. Balanço hídrico climatológico sequencial mensal

Com o auxílio do software SEVAP (Sistema de Estimativa da Evapotranspiração) proposto por Silva et al. (2005), foi feito o balanço hídrico climatológico sequencial pela metodologia de Thornthwaite para cada ano-safra em que os dados de entrada para alimentação do software foram temperatura (°C) e precipitação (mm) e os gráficos foram gerados no software Microsoft Excel.

Tabela 1. Dados de produtividade da cana-de-açúcar para os anos-safra de 1998/1999 a 2016/2017.
Table 1. Sugarcane productivity data for crop years 1998/1999 to 2016/2017.

Ano-safra	Variedade	Colheita	Época de colheita	Produtividade (t ha ⁻¹)
1998/1999	SP 79-1011	1 ^a	-	146,00
1999/2000	SP 79-1011	2 ^a	-	105,00
2000/2001	SP 79-1011	3 ^a	-	113,00
2001/2002	SP 79-1011	4 ^a	-	101,00
2002/2003	SP 79-1011	5 ^a	-	117,00
2003/2004	SP 79-1011	6 ^a	-	93,00
2004/2005 ^{PV}	SP 79-1011	7 ^a	Novembro/2005	98,00
2005/2006 ^{PC}	SP 79-1011	8 ^a	Outubro/2006	101,51
2006/2007 ^{PC}	SP 79-1011	9 ^a	Outubro/2007	113,20
2007/2008 ^{PC}	SP 79-1011	10 ^a	Outubro/2008	96,20
2008/2009 ^{PC}	SP 79-1011	11 ^a	Setembro/2009	82,73
2009/2010 ^{PC}	SP 79-1011	12 ^a	Setembro/2010	83,36
2010/2011 ^{PC}	SP 79-1011	13 ^a	Agosto/2011	84,48
2011/2012 ^{PC}	SP 79-1011	14 ^a	Julho/2012	74,28
2012/2013	-	-	Renovação de plantio	-
2013/2014 ^{PV}	VAT 90-212	1 ^a	Junho/2014	261,86
2014/2015 ^{PV}	VAT 90-212	2 ^a	Julho/2015	171,77

PC = Período de calibração dos modelos e; PV = Período de validação dos modelos. Fonte: Os autores (2022).

2.4. Modelo de Regressão Múltipla

Em seguida, as variáveis selecionadas foram utilizadas para estimar a produtividade agrícola com um modelo agrometeorológico baseado na técnica de regressão linear múltipla (Equação 1):

$$Y'_i = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + X_3 \cdot \beta_3 + X_4 \cdot \beta_4 + \varepsilon \quad (01)$$

em que: o Y'_i é o índice de produtividade agrícola estimada (dependente), X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são as variáveis independentes (irrigação mais precipitação – IP; temperatura média do ar – T; Déficit de saturação de vapor do ar – DEF e fotoperíodo – N), α , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os parâmetros a serem estimados e ε são os resíduos.

2.5. Calibração do modelo

A calibração do modelo foi feita a partir da análise prévia dos três meses antecedentes à colheita de cada ano-safra. Sendo o segundo mês antecedente à colheita escolhido porque apresentou os resultados satisfatórios.

De posse dos parâmetros encontrados, esses resultados foram avaliados através do cálculo da Diferença Média Absoluta (DMA) (Equação 2), da Diferença Média Relativa (DMR %) (Equação 3) e da Raiz da Diferença Quadrática Média (RDQM) (Equação 4), entre a produtividade estimada pelos modelos e a produtividade considerada real calculada com valores coletados em campo.

$$DMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y'_i - Y_i| \quad (02)$$

$$DMR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y'_i - Y_i|}{|Y_i|} \quad (03)$$

$$RDQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (04)$$

em que: o Y_i corresponde ao valor da produtividade observada ou real (dados que foram coletados em campo); o Y'_i corresponde ao valor de produtividade estimada pelo modelo e o n corresponde ao número de anos-safra de dados da produtividade.

2.6. Análise estatística

Para verificar o desempenho dos modelos foi realizado o cálculo do coeficiente de Pearson (Equação 5), r ($p < 0,05$) que

mede o grau da correlação e a direção dessa correlação, se positiva ou negativa entre duas variáveis de escala métrica.

$$r = \frac{C_{XY}}{S_X S_Y} \quad (05)$$

em que: o C_{XY} é a covariância ou variância conjunta das variáveis X e Y ; o S_X é o desvio padrão da variável X e o S_Y é o desvio padrão da variável Y .

Este coeficiente assume valores entre -1 e 1; quando 1 significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis e quando -1, significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta a outra sempre diminui e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados e foi dada estatisticamente pelo índice de concordância “d” proposto por Willmott et al. (1985) (Equação 6).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Y'_i - Y_i)^2}{\sum (|Y'_i - Y_i| + |Y_i - Y|)^2} \right] \quad (06)$$

em que: o Y'_i é o valor estimado; o Y_i é o valor observado e o Y é a média dos valores observados.

Seus valores variam de zero para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita.

Segundo Camargo e Sentelhas (1997), os seguintes indicadores estatísticos foram considerados para correlacionar os valores estimados com os medidos: exatidão - índice de Willmott “d” e de confiança ou desempenho “c” (Equação 7).

$$c = r * d \quad (07)$$

Mediante o valor encontrado na equação 7, os índices de desempenho são classificados conforme Camargo; Sentelhas (1997): $>0,85$ – ótimo; 0,76 a 0,85 – muito bom; 0,66 a 0,75 – bom; 0,61 a 0,65 – mediano; 0,51 a 0,60 – sofrível; 0,41 a 0,50 – mau; $\leq 0,40$ – péssimo.

3. RESULTADOS

3.1. Balanço hídrico climatológico sequencial mensal

Na Figura 1 foram apresentados os extratos dos cenários hídricos referentes aos anos-safra de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012, respectivamente; foi possível observar que durante todo o ciclo da cultura houve deficiência hídrica levando em consideração a precipitação pluviométrica que foi abaixo da média para a região; mesmo assim, não trouxe eventuais reduções na produtividade visto que a monocultura foi cultivada em área com irrigação suplementar.

Para este período avaliado, é possível constatar que os anos-safra de 2005/2006 até 2011/2012 apresentaram similaridade em relação à deficiência hídrica acentuada a partir do mês de maio, em boa parte dos anos observados, coincidentemente logo após o período em que ocorrem os picos de precipitação significativa para a região porém a produtividade agrícola não foi influenciada negativamente devido à suplementação hídrica via irrigação que ocorreu em 100% da área plantada, assim como ilustra a Figura 2.

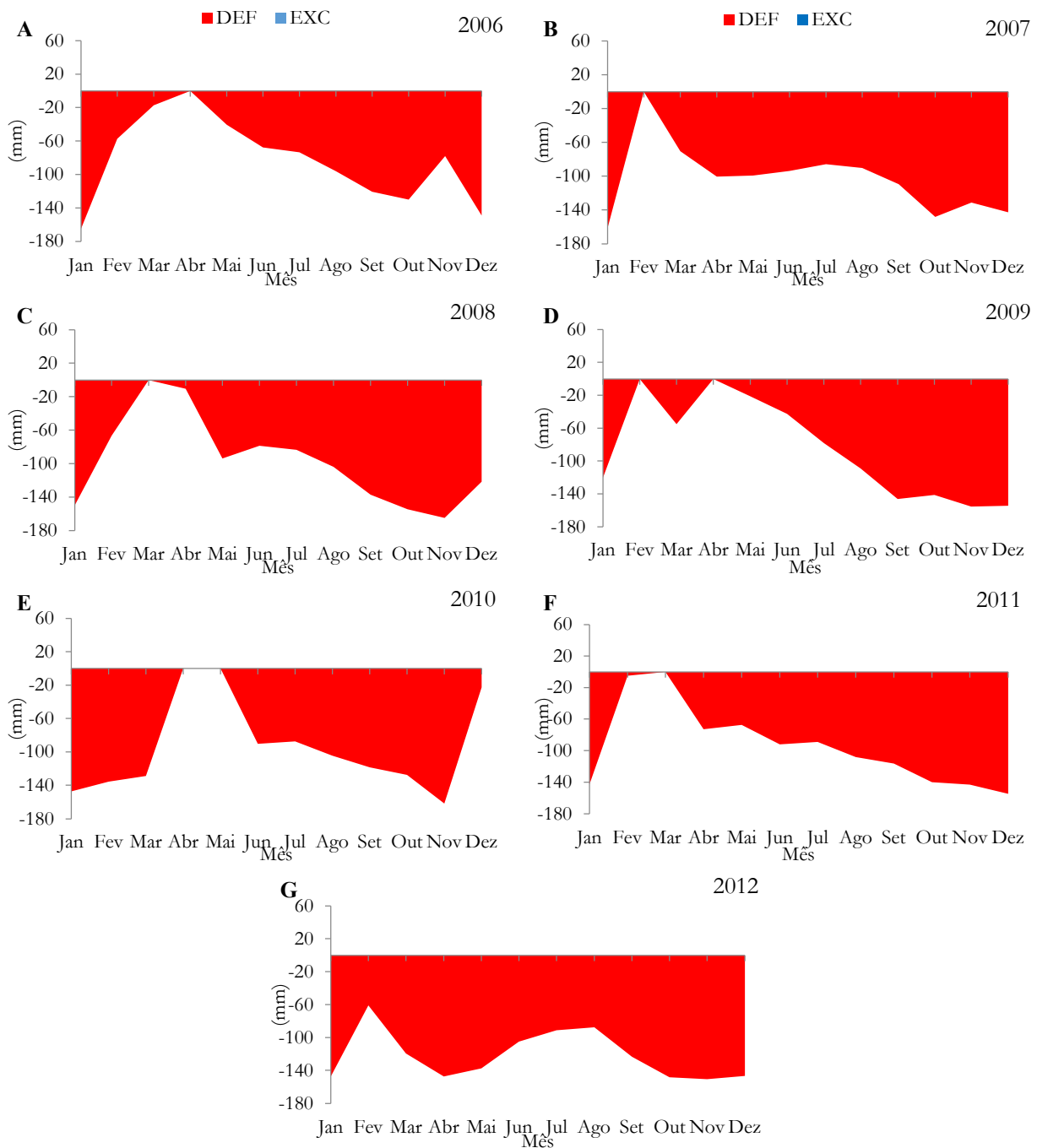


Figura 1. Extratos do cenário hídrico dos anos-safra de: 2005/2006 (A), 2006/2007 (B), 2007/2008 (C), 2008/2009 (D), 2009/2010 (E), 2010/2011 (F) e 2011/2012 (G).

Figure 1. Extract from the hydric scenario for the crop years 2005/2006 (A), 2006/2007 (B), 2007/2008 (C), 2008/2009 (D), 2009/2010 (E), 2010/2011 (F) and 2011/2012 (G).

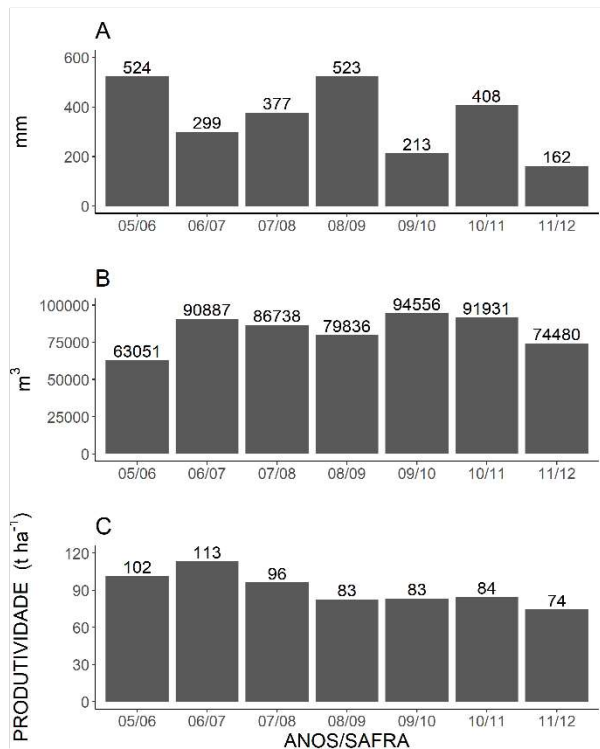


Figura 2: Precipitação acumulada (em mm) (A), volume total de água aplicado via irrigação (em m³) (B) e produtividade agrícola (t ha⁻¹) em função do cenário hídrico para os anos-safra de 2005/2006 até 2011/2012 (C).

Figure 2: Accumulated precipitation (in mm) (A), total volume of water applied via irrigation (in m³) (B) and agricultural productivity (t ha⁻¹) as a function of the hydric scenario for the crop years 2005/2006 through 2011/2012 (C).

3.2. Calibração do modelo

Na Tabela 3 é apresentado o Modelo Agrometeorológico (MA) de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade no segundo mês antecedente à colheita.

O modelo apresentou-se significativo no nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) com intervalo de confiança de 95% para o valor estimado, apresentando bom coeficiente de determinação (R^2), em torno de 99%.

Tabela 3. Coeficientes do Modelo Agrometeorológico (MA) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa.

Table 3. Coefficients of the Agrometeorological Model (MA) with their respective error probabilities (p), linear correlations (r), Willmott's agreement index (d) and Standard Error of estimation.

	Variáveis independentes do Modelo Agrometeorológico (MA)				
	α	IP	T	DEF	N
β	727,4707	0,19305	-2,45019	-0,00082	2,13792
p de erro	0,036270	0,248413	0,013016	0,017164	0,994553
Coefficientes	$r = 0,99$	$R^2 = 0,99$	$p < 0,0274$		$d = 0,99$
Erro Padrão de estimativa: 2,7264					

IP = Irrigação + Precipitação (mm); T = Temperatura média do ar (°C); DEF = Déficit de saturação de vapor do ar (hPa); N = Fotoperíodo (horas).

Tabela 4. Valores reais e estimados para o Modelo Agrometeorológico para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012.

Table 4. Real and estimated values for the Agrometeorological Model for the crop years 2005/2006 to 2011/2012.

Método de observação	Produtividade (t ha ⁻¹)						
	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012
Valor Real	101,51	113,20	96,20	82,73	83,36	84,48	74,28
Estimativa do Modelo Agrometeorológico	99,53	112,94	97,87	81,07	83,77	86,71	73,87
Residuais	1,9809	0,2578	-1,6744	1,6612	-0,4056	-2,2314	0,4115
Residuais Padronizados	0,7266	0,0946	-0,6141	0,6093	-0,1488	-0,8185	0,1509

O índice de desempenho ou confiança (c) do modelo de estimativa de produtividade ficou em torno de 0,9801, classificado como ótimo para o período analisado.

Mesmo apresentando boa significância de modo geral para o modelo e observando separadamente as variáveis que o compõem as variáveis T e DEF foram bastante significativas. A variável IP obteve uma probabilidade p de 0,248413 no segundo mês antecedente à colheita. Este mês apresentou baixo regime pluviométrico com dependência significativa da irrigação. Além disso, neste mês a irrigação foi pouco a pouco reduzida para induzir a maturação da cana-de-açúcar e garantir o máximo de sacarose nos colmos.

Na Tabela 4 são comparados os resultados reais e estimados no período de 2005/2006 a 2011/2012 pelo Modelo Agrometeorológico (MA). Os erros de ajuste ou previsão, são medidos pelo desvio (Equação 8):

$$\text{Desvio} = \text{PR} - \text{PE} \quad (08)$$

em que: PR equivale a produtividade agrícola real e; PE é a de produtividade agrícola estimada.

Conforme a Tabela 4 pode-se observar que na maioria dos anos-safra estudados (71,43%) os erros de ajustes não alcançaram um desvio padrão; por outro lado, 28,57% dos anos, o desvio varia (em valor absoluto) de até quase duas vezes o desvio padrão.

Na Figura 3A é possível observar, no gráfico, os valores correspondentes às produtividades reais e a estimada, respectivamente. De acordo com a Figura do modelo agrometeorológico, o coeficiente de determinação (R^2) foi considerado satisfatório cujas variáveis explicam 99% sem apresentar desvios significativos de ajustes, aproximando-se bem da produtividade real fornecida pela propriedade.

No caso da Figura 3B, que representa o desempenho da propriedade, apesar de apresentar proximidade dos valores reais com os estimados pelos técnicos, justificando assim o coeficiente de 99% do índice de concordância de Willmott et al. (1985), é possível identificar alguns desvios importantes de ajuste; em consequência, isto pode ocorrer com respeito para à previsão de valores futuros.

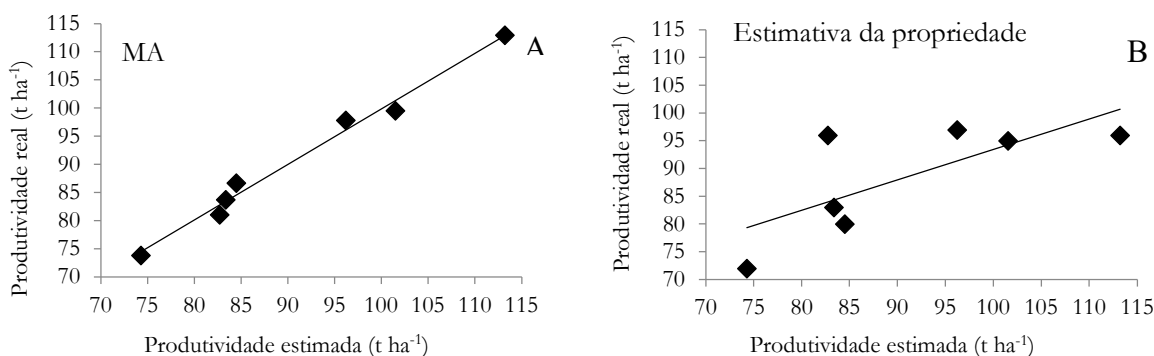


Figura 3. A relação entre a produtividade real (PR) e produtividade estimada (PE), onde em A o desempenho do modelo agrometeorológico (MA) e em B segue a estimativa da propriedade com os valores reais em relação aos valores estimados.

Figure 3. The relationship between actual productivity (PR) and estimated productivity (PE), where in A the performance of the agrometeorological model (MA) and in B follows the estimation of the property with the actual values in relation to the estimated values.

De acordo com os anos-safra testados para calibração do modelo agrometeorológico para estimativa de produtividade se encontra na Tabela 5, as respectivas Diferenças Média Absoluta (DAM), Diferença Média Relativa (DMR) e Raiz da Diferença Quadrática Média (RDQM).

Entre os anos-safra testados pelo modelo agrometeorológico a safra de 2006/2007, em que o plantio se encontrava na 9ª colheita, como pode ser observado na Tabela 5 acima, apresentou a menor diferença média relativa

de 0,23% e a maior diferença média relativa de 2,64% foi registrada na safra anterior, de 2010/2011 porém com exceção do ano de 2008/2009 e 2010/2011, os demais anos apresentaram boas diferenças médias relativas. A análise dos valores reais em relação aos estimados pela própria propriedade, a menor diferença média relativa encontrada foi de 0,43% na safra de 2009/2010 e as maiores diferenças médias relativas foram de 15,19% e 16,04% nas safras de 2006/2007 e 2008/2009, respectivamente.

Tabela 5. Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo Modelo Agrometeorológico e da propriedade, com suas respectivas Diferenças Média Absoluta (DMA), Diferença Média Relativa (DMR) e Raiz da Diferença Quadrática Média (RDQM), para os anos-safra estudados.

Table 5. Values of the real productivity ($t\ ha^{-1}_{real}$) and the productivity estimated by the Agrometeorological Model and the property, with their respective Mean Absolute Differences (MAD), Mean Relative Difference (RMD) and Root of the Mean Square Difference (RMRD), for the crop years studied.

Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)						
	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012
Valor Real	101,51	113,20	96,20	82,73	83,36	84,48	74,28
Estimativa do Modelo Agrometeorológico	99,53	112,94	97,87	81,07	83,77	86,71	73,87
DMA	1,98	0,26	1,67	1,66	0,41	2,23	0,41
DMR (%)	1,95	0,23	1,74	2,01	0,49	2,64	0,55
RDQM	3,92	0,07	2,79	2,76	0,71	4,97	0,17
Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)						
	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012
Valor Real	101,51	113,20	96,20	82,73	83,36	84,48	74,28
Estimativa da Propriedade	95,00	96,00	97,00	96,00	83,00	80,00	70,00
DMA	6,51	17,20	0,80	13,27	0,36	4,48	2,28
DMR (%)	6,41	15,19	0,83	16,04	0,43	5,30	3,07
RDQM	42,38	295,84	0,64	176,09	0,13	20,07	5,20

3.3. Validação do modelo

No período de validação descrito na Tabela 6 se encontram os valores de produtividade agrícola obtidos por cada modelo, desenvolvido para os anos das safras correspondentes à 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.

Em relação aos valores observados na Tabela 6, quando comparados com os dados apresentados na Tabela 1, foi possível compreender o comportamento das produtividades proposta pelo modelo na validação no que diz respeito à idade do dossel e às variedades, ou seja, no 7º ano de cultivo e variedade SP 79-1011 no ano-safra de 2004/2005; e no 1º e 2º ano de cultivo e variedade VAT 90-212 nos anos-safras de 2013/2014 e 2014/2015. Na Tabela 7 foram descritos os valores observados e estimados da produtividade agrícola com suas respectivas diferenças e a variação dos rendimentos agrícolas através das estimativas feitas pelo modelo

agrometeorológico; observa-se que nas safras de 2013/2014 e 2014/2015 houve uma subestimativa nos valores da produtividade; na safra de 2004/2005 ocorreu uma diferença de quase 15 toneladas superestimando a estimativa do erro padrão de quase três toneladas de cana.

A Figura 4 ilustra o comportamento de acordo com os resultados apontados na Tabela 7 citada anteriormente. De modo geral, o modelo apresentou-se significativo para estimar a produtividade desta área de estudo quando levados em consideração as variáveis intrínsecas de sua calibração.

Como ilustra a Tabela 8, para corrigir esse efeito das safras de 2013/2014 e 2014/2015, foi feita a razão das produtividades real com a estimada pelo modelo agrometeorológico, gerando um fator de correção de 11,34 e 6,23, respectivamente, para cada ano-safra.

Tabela 6. Valores da produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) calculada com o modelo agrometeorológico (MA) para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.

Table 6. Values of agricultural productivity ($t\ ha^{-1}$) calculated with the agrometeorological model (MA) for the crop years 2004/2005, 2013/2014 and 2014/2015.

Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		
	2004/2005	2013/2014	2014/2015
Valor Real	98,00	261,86	171,77
Estimativa do MA	83,19	23,10	27,59

Tabela 7. Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}\ real$) e das produtividades estimadas pelo modelo agrometeorológico (MA) e da propriedade, com suas respectivas diferenças para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.

Table 7. Values of the actual productivity (actual $t\ ha^{-1}$) and the productivity estimated by the agrometeorological model (MA) and the property, with their respective differences for the crop years 2004/2005, 2013/2014 and 2014/2015.

Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		
	2004/2005	2013/2014	2014/2015
Valor Real	98,00	261,86	171,77
Estimativa do MA	83,19	23,10	27,59
DMA	14,81	238,76	144,18
DMR (%)	15,11	91,18	83,94
RDQM	219,34	57006,34	20787,87

Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		
	2004/2005	2013/2014	2014/2015
Valor Real	98,00	261,86	171,77
Estimativa da Propriedade	96,00	235,00	180,00
DMA	2,00	26,86	8,23
DMR (%)	2,04	10,26	4,79
RDQM	4,00	721,46	67,73

Diferença média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM).

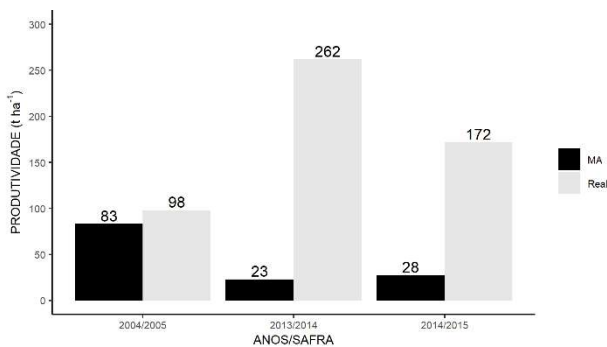


Figura 4. Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MA) no período de validação.

Figure 4. Actual agricultural productivity and that estimated by the agrometeorological model (AM) in the validation period.

Tabela 8. Correção de safra para o modelo agrometeorológico (MA).

Método de observação	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	
	2013/2014	2014/2015
Valor Real	261,86	171,77
Estimativa do MA	23,10	27,59
Fator de correção	11,34	6,23
Produtividade Corrigida	261,95	171,89

O fator de correção foi usado para ajustar e corrigir a produtividade estimada, uma vez que no período de calibração do MA a produtividade média dos anos-safras ficou em torno de $90,82\ t\ ha^{-1}$, caracterizado pelo cultivo da cana no manejo de socarias (cana soca) e intervalo entre colheitas de aproximadamente 11,6 meses, justificando um bom ajuste de estimativa do MA na validação do ano-safra de 2004/2005 devido às mesmas características citadas na calibração.

Por ser a 1ª folha (equivalente à primeira colheita) a planta ofereceu o seu máximo desenvolvimento vegetativo e agrícola fundamentado pela produtividade de $261,86\ t\ ha^{-1}$ no ano-safra de 2013/2014. No ano-safra seguinte, 2014/2015, em sua 2ª folha (cana soca) com intervalo de colheita de 12,9 meses, a produtividade diminuiu em torno de $90\ t\ ha^{-1}$ assim como o fator de correção também registou uma redução significativa de 54,94%.

4. DISCUSSÃO

4.1. Balanço hídrico climatológico sequencial mensal

Os dados observados na Figura 1 corroboram o estudo da disponibilidade hídrica da região conduzido por Lopes et al. (2017), no qual os autores relataram déficit no balanço hídrico sequencial em praticamente todo o ano na região, mesmo em anos classificados como muito chuvosos. Estes resultados evidenciam a importância da irrigação para garantir a produção agrícola da cana-de-açúcar na região.

A disponibilidade de água para a planta da cana-de-açúcar é de extrema importância para seu desenvolvimento produtivo, sabendo-se que esse consumo de água é variável de acordo com o estágio fenológico como também as variações de clima local e variedade, apresentado um consumo médio $3,5\ mm\ dia^{-1}$, de acordo com o estudo feito por Scardua e Rosenfeld (1987) e comprovado por Silva et al. (2017), que independente da disponibilidade hídrica, a variedade SP 79-1011, usada no período de calibração do modelo, apresenta significativas sensibilidades fisiológicas no que diz respeito à condutância estomática e diminuição da fotossíntese.

Ainda corroborando com os dados apresentados na Figura 1 citada anteriormente, Pereira et al. (2020) analisaram o déficit hídrico através das temperaturas do ar e das folhas em dossel cultivado comercialmente com cana-de-açúcar e constataram dificuldades em estimar fielmente o déficit devido à algumas limitações do método quando comparado ao método do teor de água disponível no solo, percebendo que este apresenta uma maior sensibilidade na identificação da escassez hídrica às plantas.

Complementando Pereira et al. (2020), o dossel de cana-de-açúcar com altura em torno de 2,8 m, consegue armazenar significativamente mais água no solo apresentando uma uniformidade bem melhor na distribuição dessa umidade quando comparado com um dossel de 0,7 m de altura, justificado pelo índice de área foliar (IAF) ser maior e dificultar a incidência de raios solares direto no solo, ou seja, diminuindo o efeito das variáveis presentes no computo do balanço hídrico (SILVA et al., 2021).

Como pode ser observado na Figura 2 citada anteriormente para o período de calibração dos modelos que foi de 2005/2006 a 2011/2012, levando em consideração o volume médio acumulado da precipitação registrada mais o volume de água fornecido via irrigação, cada ano-safra recebeu em média $83.426,71\ m^3$ de água, compensando a

variabilidade natural do regime hídrico da região e concordando com Silva et al. (2019) para o uso eficiente da água no desenvolvimento da planta e otimização da produtividade agrícola; mesmo assim foi verificada uma queda de produtividade de até 73,18% quando analisados a primeira e a última produtividade para o primeiro e o último ano, respectivamente, do período de calibração dos modelos.

Holanda et al. (2014), observaram, tentando determinar saídas para contornar o efeito significativo do déficit hídrico na produtividade agrícola, o comportamento de algumas variedades de cana-de-açúcar em diferentes condições de deficiências hídricas para auxiliar na seleção de genótipos tolerantes à seca e perceberam que as variáveis morfológicas foram eficientes para diferenciar as cultivares em tolerantes e susceptíveis.

Vianna e Sentelhas (2014), verificaram o risco de déficit hídrico da cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil, varia de acordo com a capacidade de retenção de água no solo e que a região de Petrolina-PE, apresenta maior risco devido à variabilidade climática com baixa precipitação ao longo do ano, elevadas temperaturas durante o dia e reduzida capacidade de retenção de água no solo.

4.2. Calibração do modelo

Araújo et al. (2011) e Souza et al. (2013) constataram que as interações intrínsecas (variedade, genética, etc) e extrínsecas (luz, água, solo, pragas, etc) à planta e que são difíceis de mensurar via modelagem resultam em comportamentos distintos e essenciais para a obtenção do êxito na calibração de um modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade agrícola de uma cultura qualquer, levando em consideração apenas os dados de produção e meteorológico.

Ao observar as diferenças relativas média do modelo é perceptível que não ocorreu diferença abrupta entre os valores quando comparados com os valores encontrados na estimativa da propriedade. Segundo Frizzone et al. (2005) as principais críticas aos modelos agrometeorológicos se referem às suas aplicações consideradas, muitas vezes, específicas para uma localidade ou incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água, pois é considerada apenas a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura.

4.3. Validação do modelo

Segundo Silva et al. (2017) a variedade SP 79-1011 apresenta uma sensibilidade à variabilidade de água no solo, impactando diretamente nas funções fisiológicas e consequentemente na queda de rendimento em função da redução fotossintética, o que diferencia um pouco na variedade VAT 90-212, por caracterizar às áreas de várzea, presença de umidade, conforme a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA, 2010), mostrou boa adaptação em solos com baixa umidade com resposta fisiológica positiva sem afetar significativamente sua produtividade.

Fiorio et al. (2018), complementando o que Silva et al. (2017) afirmaram, detectaram um remanejamento da reflectância e variação espectral nas folhas de cana-de-açúcar em função do déficit hídrico diagnosticado por sensores hiperespectrais em resposta significativa à redução gradativa da umidade do solo, inferindo diretamente na fotossíntese e prejudicando-a fisiologicamente na conversão para a produtividade agrícola.

Especificando os anos-safras de 2013/2014 e 2014/2015, o qual foi aplicado o fator de correção onde o MA subestimou a produtividade congruente aos valores disposto na Tabela 6, justifica-se pela renovação da área conforme descrito na Tabela 1, ocorrendo uma mudança varietal com características agronômicas distintas apontadas por Silva et al. (2017) e o intervalo de colheita de aproximadamente 18, 3 meses (mais tempo de nutrição, irrigação e variáveis meteorológicas inerentes ao seu desenvolvimento) no manejo de cana planta, ou seja, a primeira colheita dessa nova área.

No decorrer dos anos-safras seguintes, como observado em relação aos valores do fator de correção diminuírem, a tendência natural será que as produtividades reais e àquelas estimadas pelo MA irão convergir ao ponto de adequação sem a necessidade de retificar, conforme acontecerá com resultados apresentados a partir do modelo agrometeorológico-espectral desenvolvido por Silva et al. (2021) na área do mesmo canavial.

5. CONCLUSÕES

O modelo agrometeorológico mostrou boa predição da produtividade estimada em relação à produtividade real para o período de calibração.

O modelo agrometeorológico apresentou boa resposta da produtividade estimada de 83,19 t ha⁻¹ quando comparada com produtividade real de 98 t ha⁻¹ no período de validação no ano-safra de 2004/2005.

Com o subsídio do fator de correção de safra, as produtividades subestimadas nos anos-safra de 2013/2014 e 2014/2015 foram corrigidas tornando-se significativas quando comparadas com a produtividade real.

O valor do fator de correção de safra será reduzido temporalmente ao passar dos anos-safra e os modelos se ajustaram sem a necessidade da correção da produtividade estimada por eles.

6. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por fomentar a bolsa, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), à Propriedade Agrícola por ceder o espaço para desenvolvimento da Pesquisa e a toda a equipe na elaboração deste artigo.

7. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Revista Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.5062>
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, A. L. de; SOUZA, J. L. de; ALMEIDA, A. C. D.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; FERREIRA, R. A.; MAGALHÃES, I. D.; SANTOS, L. R. Sugarcane productivity simulation under diferente planting times by

- DSSAT/CANEGRO model in Alagoas, Brazil. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 30, n. 3, p. 190-198, 2018. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i3.1640>
- CONAB_Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Observatório Agrícola, Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 20 de março de 2022.
- FAO_Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 03 de ago. 2021.
- FIORIO, P. R.; COELHO, R. D.; BARROS, P. P. S.; BONILLA, M. M. Z.; GADY, A. P. B. Comportamento espectral de folhas de cana-de-açúcar na presença de déficit hídrico. **Revista Irriga**, v. 23, n. 3, p. 609-621, 2018. <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v23n3p609-621>
- FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. Funções de produção água-cultura. In: FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. (Ed.). **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, 2005. p. 283-314.
- GUNARATHNA, M.; SAKAI, K.; NAKANDAKARI, T.; MOMII, K.; KUMARI, M. K. N. Sensitivity analysis of plant and cultivar specific parameters of APSIM sugar model: variation between climates and management conditions. **Agronomy**, v. 9, n. 5, e242, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050242>
- HAMMER, R. G.; SENTELHAS, P. C.; MARIANO, J. C. Q. Sugarcane yield prediction through data mining and crop simulation models. **Sugar Tech**, v. 22, n. 2, p. 216-225, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00776-z>
- HOLANDA, L. A.; SANTOS, C. M.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUSA, A. P.; SILVA, M. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, v. 19, n. 4, p. 573-584, 2014. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n4p573>
- LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MELO, J. M. M. DE; RAMOS, C. M. C. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. **Revista Irriga**, v.22, n.1, p.443-457, 2017. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p443-457>
- LUCIANO, A. C. S.; PICOLI, M. C. A.; DUFT, D. G.; ROCHA, J. V.; LEAL, M. R. L.; MAIRE, G. L. Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale brazil using Landsat imagery and random forest algorithm. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, e106063, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106063>
- MARCARI, M. A. **Modelos agrometeorológicos estatísticos de previsão de produtividade e qualidade para cana-de-açúcar**. 47p. Dissertação [Agronomia] - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-284, 2017. <https://doi.org/10.1071/CP16334>
- PEREIRA, R. M.; CASAROLI, D.; VELLAME, L. M.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A.W. P; BATTISTI, R. Water deficit detection in sugarcane using canopy temperature from satellite images. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 3, p. 400-407, 2020. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.03.p1647>
- SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 373-431.
- SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F. B.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.
- SILVA, T. G. F. da; MOURA, M. S. B. de; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 139-147, 2011.
- SILVA, M. V. P.; SILVA, J. F.; SILVA, E. dos S. S.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MOUSINHO, F. E. P. Parâmetros fisiológicos de variedades de cana-de-açúcar submetidos a distintos regimes hídricos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 509-518, 2017. <https://doi.org/10.24221/jecap.2.4.2017.1486.509-518>
- SILVA, E. M. P.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; Produtividade de colmos e eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 162-176, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p162-176>
- SILVA, M. M.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; MELO FILHO, M. S.; SILVA, E. F. F.; SANTOS, J. B. Uniformidade da irrigação por aspersão em função da altura do dossel da cana de açúcar. **Irriga**, v. 26, n. 1, p. 195-209, 2021. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n1p195-209>
- SILVA, A. S.; COSTA, M. A.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; GUIMARÃES, M. J. M.; GOMES, A. W. A. Agrometeorological-spectral model for estimating sugarcane productivity in Brazilian semi-arid. **Irriga**, v. 26, n. 3, p. 490-506, 2021. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p490-506>
- SOUZA, J. L. M.; GERSTEMBERGER, E.; ARAUJO, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 409-418, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400007>
- VIANNA, M. S.; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000400001>
- VERMA, A. K.; GARG, P. K.; PRASAD, K. S. H.; DADHWAL, V. K.; DUBEY, S. K.; KUMAR, A. Sugarcane yield forecasting model based on weather parameters. **Sugar Tech**, v. 23, n. 1, p. 158-166, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00900-4>
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geography Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>