

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 05/04/2026.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**Previsão e estimativa da produtividade de milho e cana-de-  
açúcar utilizando Inteligência artificial e sensoriamento  
remoto**

**Antonio Alves Pinto**

Engenheiro Agrônomo

**2024**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**Previsão e estimativa da produtividade de milho e cana-de-  
açúcar utilizando Inteligência artificial e sensoriamento  
remoto**

**Discente: Eng. Agrônomo. Antonio Alves Pinto**

**Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim**

**Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Zerbato**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

**2024**

P659p

Pinto, Antonio Alves

Previsão e estimativa da produtividade de milho e cana-de-açúcar utilizando Inteligência artificial e sensoriamento remoto / Antonio Alves Pinto. -- Jaboticabal, 2024

82 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Cristiano Zerbato

1. Agricultura digital. 2. Sensoriamento orbital. 3. Modelagem da produtividade. 4. Agricultura de precisão. 5. PCA. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

### **Impacto potencial desta pesquisa**

Esta pesquisa desempenha um papel importante no impulsionamento da utilização de técnicas de aprendizado de máquina na agricultura, ao apresentar novas abordagens metodológicas para a previsão da produtividade de milho (*Zea mays* L.) e estimativa da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.).

### **Potential impact of this research**

This research plays an important role in boosting the use of machine learning techniques in agriculture, by presenting new methodological approaches for predicting corn (*Zea mays* L.) productivity and estimating sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity L.).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PREVISÃO E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE MILHO E CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SENSORIAMENTO REMOTO

AUTOR: ANTONIO ALVES PINTO

ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

COORIENTADOR: CRISTIANO ZERBATO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. LUAN PEREIRA DE OLIVEIRA (Participação Virtual)  
Department of Horticulture / University of Georgia (UGA) - Tifton/EUA

Documento assinado digitalmente

LUAN PEREIRA DE OLIVEIRA  
Data: 22/04/2024 22:29:03-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. LUCAS EDUARDO DE OLIVEIRA APARECIDO (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Agrícola/Agrometeorológica/Climatologia Agrícola / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Muzambinho/MG

Prof. Dr. EDUARDO NARDINI GOMES (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Agrônoma / FCAVR UNESP Registro

Documento assinado digitalmente

EDUARDO NARDINI GOMES  
Data: 24/04/2024 11:14:43-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 05 de abril de 2024

Documento assinado digitalmente  
LUCAS EDUARDO DE OLIVEIRA APARECIDO  
Data: 25/04/2024 15:00:42-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

ANTONIO ALVES PINTO - Natural de Jardim - CE, nascido em 1º de julho de 1995, filho de Zenicleide Alves dos Santos e Luís Antonio Pinto. Formado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Cariri - UFCA, no ano de 2018, desenvolveu durante a graduação trabalhos na área de fitotecnia, nutrição de plantas, máquinas e mecanização agrícola, sob orientação da Prof. Dr. Felipe Thomaz da Camara. Em março de 2019 iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, desenvolvendo pesquisas na área de engenharia de água e solo, sob orientação do Prof. Dr. Afonso Lopes. A dissertação foi defendida em julho de 2020. No mês seguinte deu início ao doutorado em Agronomia – Produção vegetal pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Câmpus Jaboticabal, sob a orientação do professor Dr. Glauco de Souza Rolim.

“Escale todas as montanhas, cruze todos os rios, siga todos os arco-íris, até encontrar seus sonhos”

Rodgers e Hammerstein

Dedico...

A meus pais, meus irmãos e aos meus amigos pelo amor incondicional, e por todo o incentivo para chegar até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, primeiramente pelo dom da vida.

Aos meus pais Zenicleide e Luís que sempre estiveram presentes me apoiando e sonhando junto comigo.

Aos meus irmãos por sempre acreditarem em mim.

Aos meus amigos Luís Fernando, José Lucas, João de Deus, pelo apoio, amizade e por todos os momentos que passamos juntos.

À Tamires Doroteo pelo apoio e companheirismo.

Ao Professor Dr. Glauco de Souza Rolim, pela orientação, ensinamentos nas atividades desenvolvidas, amizade concedida e colaboração no trabalho.

Ao Professor Dr. Cristino Zerbato, pela coorientação, ensinamentos nas atividades desenvolvidas, apoio emocional e amizade concedida.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – UNESP/FCAV, pela oportunidade de realização do curso.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pelos conhecimentos transmitidos no decorrer do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por conceder a bolsa de estudo.

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

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	11
1. INTRODUÇÃO .....	11
2. HIPÓTESE .....	12
3. OBJETIVOS .....	13
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
4.1. Importância econômica do milho .....	13
4.1.1. Fenologia do milho.....	14
4.1.2. Sensoriamento remoto no milho .....	15
4.1.3. Aprendizado de máquinas no milho.....	17
4.1.4. Importância econômica da cana-de-açúcar.....	20
4.1.5. Fenologia da cana-de-açúcar .....	20
4.1.6. Sensoriamento remoto na cana-de-açúcar.....	22
4.1.7. Aprendizado de máquinas na cana-de-açúcar .....	24
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
CAPÍTULO 2: PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE DO MILHO UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO, SOMA DE GRAUS-DIA E MODELOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA.....	32
1. INTRODUÇÃO .....	34
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	37
2.1. Local de estudo .....	37
2.1. Obtenção e processamento de imagens de satélite .....	38
2.2. Variáveis de entradas dos modelos .....	41
2.3. Aquisição dos dados de produtividade .....	43
2.4. Modelos de aprendizado de máquina .....	44
2.5. Análise de desempenho dos modelos .....	44
3. RESULTADOS .....	45
4. DISCUSSÃO .....	49
5. CONCLUSÃO.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

CAPÍTULO 3: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DOS DADOS ESPECTRAIS E DO MOTOR.....	57
1. INTRODUÇÃO .....	59
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	60
2.1. Local de estudo .....	60
2.2. Obtenção e processamento de imagens de satélite .....	61
2.3. Aquisição dos dados de produtividade e do motor .....	63
2.4. Variáveis de entradas dos modelos .....	64
2.5. Modelos de aprendizado de máquina .....	65
2.6. Análise de desempenho dos modelos .....	66
3. RESULTADOS .....	67
3.1. Estatística descritiva dos dados da colhedora e produtividade.....	67
3.2. Seleção de variáveis preditoras PCAs.....	68
3.3. Avaliação de Precisão e Acurácia dos modelos. ....	70
4. DISCUSSÃO .....	72
5. CONCLUSÃO.....	74
6. REFERÊNCIAS.....	75

# **Previsão e estimativa da produtividade de milho e cana-de-açúcar utilizando Inteligência artificial e sensoriamento remoto**

## **RESUMO**

A necessidade de avanços nas técnicas de estimativa e previsão da produtividade de cultura agrícolas utilizando técnicas não destrutivas tem impulsionado o desenvolvimento de novas pesquisas utilizando técnicas de aprendizado de máquina associado a dados obtidos por sensoriamento remoto. A estimativa é o cálculo de uma condição atual, enquanto, a previsão é a projeção de uma condição futura. Buscando contribuir com os avanços na estimativa e previsão da produtividade utilizando técnicas não destrutivas, foram desenvolvidos experimentos para os cultivos de milho e cana-de-açúcar. No primeiro capítulo apresenta-se o referencial teórico que aborda desde a importância econômica, fenologia, aplicações de sensoriamento remoto até o uso de aprendizado de máquina no cultivo de milho e na cana-de-açúcar. No segundo capítulo é apresentado os resultados obtidos a partir de uma abordagem baseada em classes de graus dias acumulados do cultivo de milho para organizar os dados das imagens de satélite em duas safras em que o modelo extreme gradient boosting (XGBoost), obteve acurácia superior ao k-nearest neighbors (KNN) na previsão da produtividade do cultivo de milho. No terceiro capítulo, foi realizado um experimento no cultivo de cana-de-açúcar com o objetivo de investigar a análise de componentes principais e integração de séries temporais de imagens do satélite Sentinel-2 e variáveis do motor, como entradas em modelos de aprendizado de máquina para estimar a produtividade da cultura, concluindo-se que o modelo Support Vector Machine (SVM), utilizando as Análise de Componentes Principais (PCAs) da integração de séries temporais de bandas espectrais e dados do motor apresentou maior acurácia, com RMSE de 4,20 t ha<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** Agricultura digital, sensoriamento orbital, modelagem da produtividade, agricultura de precisão, análise de componentes principais.

# Forecasting and estimation of corn and sugarcane yield using Artificial Intelligence and remote sensing

## ABSTRACT

The need for advanced techniques for estimating and forecasting agricultural crop productivity using non-destructive techniques has driven the development of new research using machine learning techniques associated with data obtained by remote sensing. Estimation is the calculation of a current condition, while forecasting is the projection of a future condition. Experiments were developed for corn and sugar cane crops to contribute to advances in productivity estimation and forecasting using non-destructive techniques. The first chapter presents the theoretical framework where we address the economic importance, phenology, remote sensing applications, and the use of machine learning in corn and sugar cane. The second chapter presents the results obtained from an approach based on classes of accumulated degree days of the corn crop to organize satellite image data in two harvests in which the XGBoost model achieved greater accuracy than KNN in predicting yield. In the third chapter, an experiment was carried out in the sugarcane crop to investigate the analysis of principal components and integration of time series of Sentinel-2 images and engine variables, as inputs in machine learning models. to estimate crop productivity, concluding that the SVM model using PCAs from the integration of time series of spectral bands and engine data presented greater accuracy, with RMSE of 4.20 t ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Digital agriculture, orbital sensing, productivity modeling, precision agriculture, principal component analysis.

## **CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1. INTRODUÇÃO**

Esta tese foi estruturada em quatro capítulos, abordando as técnicas aprendizado de máquina associado ao sensoriamento remoto orbital na previsão e estimativa da produtividade de cultivo de milho e cana-de-açúcar, respectivamente. Esta pesquisa desempenha um papel importante no impulsionamento da utilização de técnicas de aprendizado de máquina na agricultura, ao apresentar novas abordagens metodológicas para a previsão da produtividade de cultivo de milho e estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

Os avanços das técnicas não destrutivas utilizadas nas previsões e estimativas de fatores agronômicos das plantas são fundamentais no entendimento das relações entre esses fatores, nesse sentido, o sensoriamento possui uma diversidade de sensores e níveis de aquisição, além disso, não necessita de contato direto com os alvos e nem causa danos nos cultivos durante a obtenção dos dados. Dessa forma, pesquisadores têm buscado entender a relações das informações espectrais com os fatores agronômicos das plantas, utilizando aprendizado de máquina para lidar com o volume e diversidade dos dados provenientes do sensoriamento.

O Primeiro capítulo é constituído pelo referencial teórico que suporta as hipóteses de que o sensoriamento remoto associado a modelos de aprendizado de máquina tem potencial para gerar modelo preditivos acurados, esse capítulo aborda desde a importância econômica dos cultivos, passando pela fenologia, aplicações de sensoriamento remoto até o uso de aprendizado de máquina no cultivo de milho e na cana-de-açúcar.

O segundo capítulo apresenta os resultados obtidos a partir de uma abordagem baseada em classes de graus dias acumulados do cultivo de milho para organizar os dados das imagens de satélite em duas safras, utilizando posteriormente esses dados como variáveis de entradas em modelos de aprendizado de máquina para prever a produtividade do cultivo de milho antes da colheita.

No terceiro capítulo, utilizamos como variáveis de entradas em modelos de aprendizado de máquina para estimar a produtividade da área cultivada com cana-de-açúcar, uma abordagem baseada na análise de componentes principais e integração de séries temporais de imagens do Sentinel-2 com parâmetros do motor.

## **5. CONCLUSÃO**

A abordagem baseada na análise de componentes principais da integração de séries temporais de imagens do Sentinel-2 e dados do motor, como variáveis de entradas em modelos de aprendizado de máquina para estimar a produtividade da cana-de-açúcar, permitiu o desenvolvimento de modelos de estimativa de produtividade na área estudada. O modelo SVM utilizando as PCAs da integração de séries temporais de bandas espectrais e dados parâmetros dos motor apresentou maior precisão e acurácia ( $R^2$  de 0,44 e RMSE 4,20 t ha<sup>-1</sup>).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da UNESP (Universidade Estadual Paulista) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Código Financeiro 001).

## 6. REFERÊNCIAS

Abbas F, Afzaal H, Farooque AA, Tang S (2020) Crop yield prediction through proximal sensing and machine learning algorithms. **Agronomy** 10, 1046. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071046>.

Alemán-Montes B, Zabala A, Henríquez C, Serra P (2023) Modelling Two Sugarcane Agro-Industrial Yields Using Sentinel/Landsat Time-Series Data and Their Spatial Validation at Different Scales in Costa Rica. **Remote Sensing**, 15, 5476. <https://doi.org/10.3390/rs15235476>

Arnold, C.Y. 1995. **The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system**. Proceedings of the American Society for Horticultural Science 74,430–450.

Barzin R, Pathak R, Lotfi H, Varco J, Bora GC (2020) Use of UAS Multispectral Imagery at Different Physiological Stages for Yield Prediction and Input Resource Optimization in Corn. **Remote Sensing**, 12, 2392. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152392>.

Canata TF, Wei MCF, Maldaner LF, Molin JP (2021) Sugarcane Yield Mapping Using High-Resolution Imagery Data and Machine Learning Technique. **Remote Sensing**, 13, 232. <https://doi.org/10.3390/rs13020232>.

Dimov D, Uhl JH, Low F, Seboka GN, (2022) Sugarcane yield estimation through remote sensing time series and phenology metrics. **Smart Agricultural Technology**, 2, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100046>

Dubey SK, Gavli AS, Yadav SK, Sehgal S, Ray SS (2018) Remote Sensing-Based Yield Forecasting for Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Crop in India. Journal of the Indian Society. **Remote Sensing**, 46, 1823–1833. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0839-2>

FIETZ CR., FISCH GF, COMUNELLO E, FLUMIGNAN DL. (2017) **O clima da região de Dourados, MS**. 3. ed. rev. e atual. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017. 34 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 138).

Guo Y, Wang H, Wu Z, Wang S, Sun H, Senthilnath J, Wang J, Bryant CR, Fu, Y. (2020). Modified Red Blue Vegetation Index for Chlorophyll Estimation and Yield

Prediction of Maize from Visible Images Captured by UAV. *Sensors*, 20, 5055; doi:10.3390/s20185055.

Hariharan R (2021). Random forest regression analysis on combined role of meteorological indicators in disease dissemination in an Indian city: A case study of New Delhi. *Urban Climate*, 36, 100780. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100780>.

Kannangara M, Dua R, Ahmadi L, Bensebaa F (2018) Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. *Waste Manag*, 74,3 -15.

Maldaner LF, Canata TF, Molin, JP (2022a). An Approach to Sugarcane Yield Estimation Using Sensors in the Harvester and ZigBee Technology. *Sugar Tech*, 24, 813–821. <https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12355-021-01050-x>

Maldaner LF, Corrêdo LP, Canata TF, Molin JP (2021b) Predicting the sugarcane yield in real-time by harvester engine parameters and machine learning approaches. *Computers and Electronics in Agriculture* 181, 105945. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105945>

Maldaner LF, Molin JP, Spekken M (2021b) Methodology to filter out outliers in high spatial density data to improve maps reliability. *Scientia Agricola*, 79, e20200178. <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0178>.

Molijn RA, Iannini L, Rocha JV, Hanssen R.F (2019) Sugarcane productivity mapping through C-band and L-band SAR and optical satellite imagery. *Remote Sensing*, 11, 1109. <https://doi.org/10.3390/rs11091109>

Nava SC, Huerta AJ, Cruz JMPDL, Rodríguez, EM. (2016) Leaf Growth and Canopy Development of Three Sugarcane Genotypes under High Temperature Rainfed Conditions in Northeastern Mexico. *International Journal of Agronomy*, 2561026, 7 <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2561026>.

Nihar A, Patel NR, Danodia A (2022) Machine-Learning-Based Regional Yield Forecasting for Sugarcane Crop in Uttar Pradesh, *India Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50, 1519–1530. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01549-0>

Oliveira RP, Barbosa Júnior MR, Pinto AA, Oliveira JLP, Zerbato C, Furlani CEA. (2022) Predicting Sugarcane Biometric Parameters by UAV Multispectral Images and Machine Learning. *Agronomy* 12, 1992. <https://doi.org/10.3390/agronomy12091992>.

Pinto AA, Zerbato C, Rolim G S, Barbosa Júnior MR Silva, LFV, Oliveira RP (2022). Corn grain yield forecasting by satellite remote sensing and machine learning models. *Agronomy journal*, 1-20. <https://doi.org/10.1002/ajj2.21141>.

Pimentel Gomes F (2009) **Curso de estatística experimental**. 15. ed. FEALQ, Piracicaba.

Ramos APM, Osco LP, Furuya DEG, Gonçalves WN, Santana DC, Teodoro LPR Silva Junior CA, Capristo-Silva GF, Li J, Baio FHR, Marcato Junior J, Teodoro PE, Pistori H (2020). A random forest ranking approach to predict yield in maize with uav-based vegetation spectral indices. **Computers and Electronics in Agriculture** 178, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105791>.

Som-ard J, Atzberger C, Izquierdo-Verdiguier E, Vuolo F, Immitzer M, (2021) Remote Sensing Applications in Sugarcane Cultivation: A Review. **Remote Sensing**, 13, 4040. <https://doi.org/10.3390/rs13204040>.

Yang W, Zhao Y, Wang D, Wu H, Lin A, He L (2020) Using Principal Components Analysis and IDW Interpolation to Determine Spatial and Temporal Changes of Surface Water Quality of Xin'anjiang River in Huangshan, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17, 2942. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082942>.

Zhao D, Gordon VS, Comstock JC, Glynn NC, Johnson RM (2016). Assessment of Sugarcane Yield Potential across Large Numbers of Genotypes using Canopy Reflectance Measurements. **Crop Science**, 56, 1747–1759. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.12.0747>

Zhou X, Kono Y, Win A, Tsutomu Matsui T, Tanaka TST (2021) Predicting within-field variability in grain yield and protein content of winter wheat using UAV-based multispectral imagery and machine learning approaches. **Plant Production Science**, 24, 137-151. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1819165>

Zhu L, Liu X, Wang Z, Tian L (2023) High-precision sugarcane yield prediction by integrating 10-m Sentinel-1 VOD and Sentinel-2 GRVI indexes. **European Journal of Agronomy**, 149, 126889. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126889>