

Análise multivariada de dados orbitais ópticos multiespectrais e de levantamento aerofotogramétrico de baixas altitudes na perícia de local relacionado com incidência de fogo em atividade canavieira

A.A. Costa^{a,*}, L.E. Alberguine^b, M.C. Santos^{c,d}

^a Instituto de Criminalística, Superintendência da Polícia Técnico-Científica, São Paulo (SP), Brasil

^b Alberguine Agrimensura & Topografia, Jaboticabal, São Paulo (SP), Brasil

^c Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química de Araraquara, São Paulo (SP), Brasil

^d Alternative Technologies of Detection, Toxicological Evaluation and Removal of Micropollutants and Radioactives (INCT-DATREM), Institute of Chemistry, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo (SP), Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: aleaugustoc@gmail.com. Tel.: +55- 16-3204-4518.

Recebido em 23/09/2023; Revisado em 11/09/2023; Aceito em 12/11/2023

Resumo

As condições de manejo da atividade canavieira redundam no aumento dos riscos à ocorrência de fogo. Os impactos ambientais e sociais conduziram à implementação de instrumentos jurídicos voltados à eliminação gradativa da queima da palhada da cana-de-açúcar. A incidência de fogo na canavieira pode ensejar a responsabilização penal pela adequação típica da conduta de terceiros ao crime de incêndio previsto no artigo 250 do Código Penal ou, ainda, por falsidade ideológica (artigo 299 do Código Penal) na hipótese de o produtor registrar ocorrência criminal como forma de se eximir de sanções administrativas. Dada a relevância no contexto da atividade pericial criminal, faz-se necessário o aperfeiçoamento de metodologias aptas a fornecer subsídios à instrução probatória. Neste trabalho, utilizou-se a Análise de Componentes Principais, para avaliar dados multiespectrais provenientes de sensores orbitais ópticos, bem como obtidos de levantamento aerofotogramétrico realizado por aeronave remotamente pilotada. Os índices espectrais de vegetação (NDVI), de umidade (NDII), de senescência (PSRI) e declividade foram avaliados em 7 (sete) talhões (A-F) de cultura canavieira. Elaborou-se uma matriz com 884 linhas (pontos amostrais correspondentes a pixels das imagens) e 4 colunas (variáveis de resposta), sendo os dados autoescalados. Os resultados da PCA revelaram que duas componentes principais representam 97% da variância dos dados originais. Apesar da inexistência de divergências significativas nos valores de NDVI, NDII e PSRI entre os talhões, houve clara diferenciação na variável declividade do terreno quando comparada o talhão A em relação aos demais talhões, o que fragiliza a hipótese de incidência acidental do fogo.

Palavras-Chave: Espectroscopia de reflectância; Sensoriamento Remoto; ARP

Abstract

The management conditions of the sugarcane activity result in an increase in the risk of fire. The environmental and social impacts led to the implementation of legal instruments aimed at gradually eliminating the burning of sugarcane straw. The incidence of fire in sugarcane plantations may give rise to criminal liability for the typical adequacy of the conduct of third parties to the crime of fire provided for in art. 250 of the Penal Code or, even, for ideological falsehood (art. 299 of the Penal Code) in the event that the producer registers a criminal occurrence as a way of exempting himself from administrative sanctions. Given the relevance in the context of criminal expert activity, it is necessary to improve methodologies able to provide subsidies to evidentiary instruction. In this work, Principal Component Analysis was used to evaluate multispectral data from optical orbital sensors, as well as those obtained from aerial photogrammetric surveys carried out by remotely piloted aircraft. The spectral indices of vegetation (NDVI), moisture (NDII), senescence (PSRI) and slope were evaluated in 7 (seven) plots (A-F) of sugarcane culture. A matrix with 884 rows (sample points corresponding to image pixels) and 4 columns (response variables) was created, with the data being autoscaled. The PCA results revealed that two principal components represent 97% of the original data variance. Despite the lack of significant divergences in the values of NDVI, NDII and PSRI between the plots, there was a clear difference in the terrain slope variable when comparing plot A in relation to the other plots, which weakens the hypothesis of accidental fire incidence.

Keywords: Reflectance Spectroscopy; Remote Sensing; RPA

1. INTRODUÇÃO

A incidência de fogo constitui um evento relativamente comum nas áreas rurais destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar. Isso ocorre em função de dois motivos principais.

O primeiro resulta do fato de que o processo de maturação caracterizado pelo acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar é favorecido por condições ambientais adversas ao seu crescimento, de modo que o estresse hídrico na fase de maturação potencializa a produção de sacarose [1].

A restrição hídrica pode ocorrer aumentando-se o intervalo entre as irrigações ou interrompendo-as completamente algum tempo antes da colheita [2].

A indução ao processo de maturação por estresse hídrico decorrente da falta de irrigação pode propiciar teores de baixa umidade e de elevada disponibilidade de biomassa seca, condições adequadas ao início e à propagação de fogo.

Além disso, a queima prévia constitui eficiente operação de limpeza dos canaviais, influenciando positivamente o desempenho operacional na medida em que a eliminação das folhas se configura como meio facilitador das operações de colheita tanto manual quanto mecânica com redução dos custos entre 30 a 50% [3], assim como diminui os custos de transporte pela redução do volume de palha [4].

As queimadas são definidas como aplicações controladas de fogo na vegetação natural ou plantada, sob determinadas condições ambientais que permitam mantê-lo confinado em uma determinada área e ao mesmo tempo produzir uma intensidade de calor e velocidade de espalhamento desejáveis aos objetivos de manejo [5].

Todavia, em virtude de seus impactos ambientais e sociais [6], no âmbito do Estado de São Paulo foi publicada a Lei 11.241/2002 [7], regulamentada pelo Decreto Estadual 47.700/2003 [8] tem como objetivo a eliminação gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar.

Há que se observar, ainda, que o artigo 38 da Lei de Proteção da Vegetação Nativa – Lei 12.651/2012 – proíbe o uso de fogo na vegetação, exceto em locais ou regiões cujas peculiaridades o justifiquem em práticas agropastoris ou florestais [9]. Nesse caso, coube ao Decreto Federal 2.661/1998 estabelecer as normas de precaução relativas ao emprego do fogo [10].

Embora as queimadas praticadas em desacordo com a legislação vigente possam estar sujeitas às penalidades administrativas de embargo e de multa dos artigos 16 e 58 do Decreto 6.514/2008, não representam, em si mesmas, condutas que configurem ilícito penal [11].

Não obstante, as delegacias de polícia inseridas em regiões de matriz agrícola predominantemente canavieira

registram considerável volume de casos de incidência de fogo em canaviais.

Embora tais registros sejam, geralmente, realizados pelos proprietários ou arrendatários dos imóveis rurais atingidos pelo fogo, procedendo-se como forma de preservação de direitos e sob a alegação de se tratar de fogo acidental ou provocado por terceiros, tais ocorrências são tipificadas pelas autoridades policiais como se tratando do crime de incêndio do artigo 250, do Código Penal [12] e, em razão disso, resultam em requisições que aportam nas unidades dos Institutos de Criminalística.

Em princípio, o interesse pericial concentra-se na possibilidade de que o fogo tenha atingido espaços territoriais especialmente protegidos pela legislação ambiental. Contudo, os vestígios podem conduzir à conclusão de que a suposta vítima promoveu o registro da ocorrência com a finalidade de alterar a verdade sobre fato juridicamente relevante, eximindo-se da responsabilidade administrativa decorrente do uso irregular do fogo. Com isso, restaria configurada conduta que se amolda ao crime de falsidade ideológica do artigo 299, *caput*, do Código Penal.

Ocorre que é comum os locais desta natureza não estarem preservados nos termos do disposto nos artigos 6º, I, 158-A, §2º e 169, todos do Código Processo Penal vigente [13] ou que haja considerável lapso temporal transcorrido entre as datas do fato e da requisição de exame pericial.

Dessa forma, o desaparecimento dos vestígios pode prejudicar tanto a instrução probatória da fase investigativa preliminar quanto os procedimentos da fase judicial da persecução penal.

No entanto, o aperfeiçoamento das técnicas e metodologias empregadas na instrução processual penal exige alinhamento às crescentes inovações tecnológicas [14].

Assim, por meio de ferramentas estatísticas multivariadas (Análise por Componentes Principais), avaliou-se a integração entre dados multiespectrais obtidos por sensores orbitais ópticos e dados planialtimétricos produzidos por levantamento aerofotogramétrico de baixas altitudes como metodologia aplicada à perícia de locais relacionados com incidência de fogo em atividades de cultura de cana-de-açúcar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo correspondia a 7 (sete) talhões, identificados de A a G, os quais estavam situados na área rural do noroeste do estado de São Paulo e eram ocupados por cana-de-açúcar de cultivar RB 92-579 com data de plantio em 14/04/2018 (Figura 1).

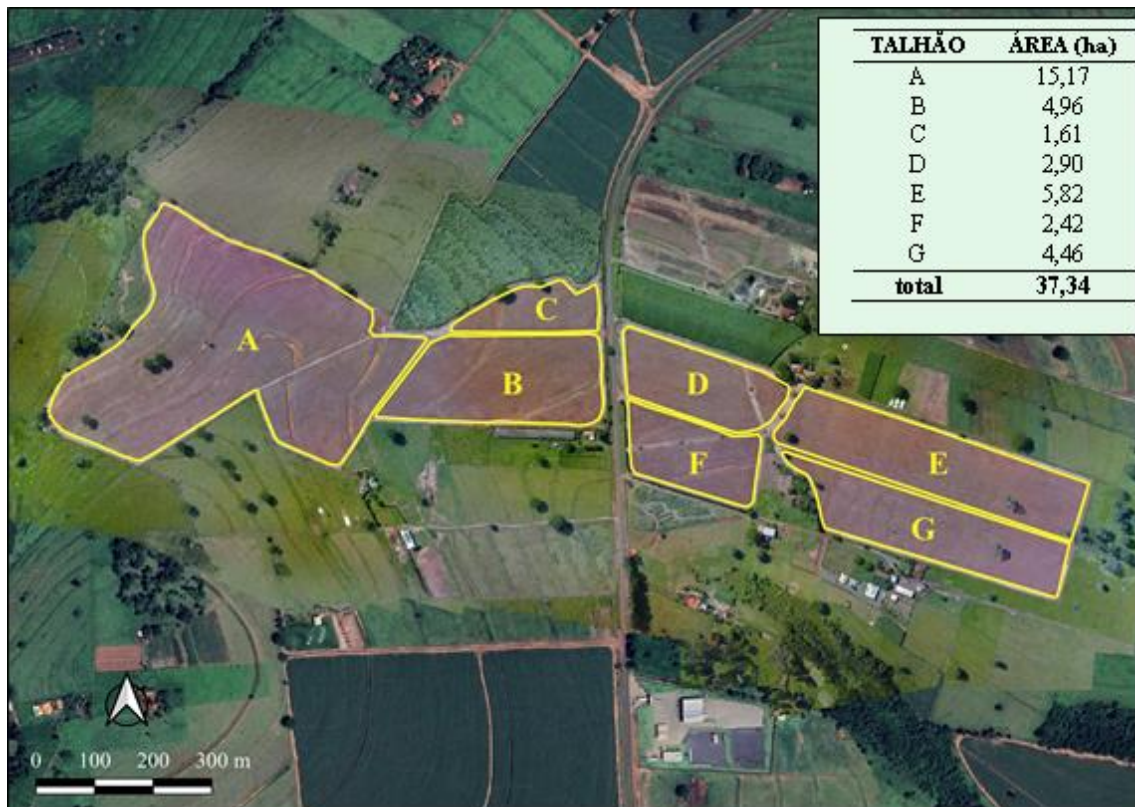


Figura 1. Ortofotomosaico elaborado a partir de levantamento com aeronave remotamente pilotada com sobreposição em imagem do Google Earth Pro evidenciando os contornos poligonais dos perímetros dos talhões objetos de estudo.

Os elementos referenciais de localização foram intencionalmente suprimidos com a finalidade de se preservar a identidade das partes envolvidas na demanda judicial.

2.2. Verificação da data de incidência do fogo

A data de incidência do fogo foi verificada pela consulta às informações constantes no histórico do boletim de ocorrência criminal, as quais foram confrontadas com os focos anômalos de calor inseridos nos contornos poligonais da área de estudo obtidos na plataforma do Programa Queimadas, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No referido portal são disponibilizados dados fornecidos por dez satélites com sensores ópticos operando na faixa termal-média de $4\mu\text{m}$ [15].

2.3. Critério de escolha das imagens

Foram utilizadas imagens com padrão nível 2A, ou reflectância ao nível do solo, acessadas na plataforma *Copernicus Open Access Hub* [16], as quais foram obtidas pelo sistema sensor óptico MSI (*MultiSpectral Instrument*) dos satélites da missão Sentinel 2, com data de aquisição imediatamente anterior (05/08/2020) e nas duas datas imediatamente posteriores à incidência do fogo (10/08/2020 e 15/08/2020).

A missão Sentinel-2 é uma iniciativa da *European Space Agency* (ESA) que integra o programa Copernicus,

sendo composta por dois satélites idênticos: Sentinel-2A, lançado em 2015, e Sentinel-2B, lançado em 2017 [17], que distam 180° , o que reduz à metade o tempo de revisita.

2.4. Ampliação de contraste por composição falsa-cor da área atingida pelo fogo

As mudanças nas respostas espectrais ocorridas nas imagens foram comparadas a partir do aumento de contraste utilizando-se composição falsa-cor com empilhamento das bandas espectrais 12 ($2,10$ a $2,28\mu\text{m}$), 8A ($0,85$ a $0,87\mu\text{m}$) e 4 ($0,65$ a $0,68\mu\text{m}$) nos canais R (vermelho), G (verde) e B (azul), respectivamente.

Em função da desidratação promovida pelas altas temperaturas, a vegetação afetada pelo fogo tende a aumentar o albedo nas bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), tornando-as, em função disso, valiosas para mapear os danos causados pelo fogo [18].

Além disso, ocorre uma redução do albedo no infravermelho próximo (NIR), o que gera a declividade espectral que embasa a maioria dos índices espectrais que visam avaliar a severidade das queimadas [19].

2.5. Cálculo dos índices espectrais

Com a finalidade de avaliar as condições de vulnerabilidade da área de estudo à ocorrência de incêndios ou queimadas, foram calculados os índices espectrais indicativos de verdor, umidade e senescência

nas bandas da imagem anteriores à incidência do fogo (05/08/2020).

Para verificar o verdor, indicativo da disponibilidade de material combustível, bem como do estágio de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, empregou-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) [20].

O NDVI mede o verdor em função da atividade fotossintética comparando-se a intensidade da feição infravermelho próximo (0,78 a 0,90 μm) que corresponde à banda 8 do MSI, em relação ao vermelho (0,65 a 0,68 μm), banda 4 do MSI, pela fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{B8} - \text{B4}) / (\text{B8} + \text{B4})$$

O grau de umidade da vegetação foi investigado pelo NDII (*Normalized Difference Infrared Index*) [21] que avalia a intensidade da maior feição de absorção na região do infravermelho próximo (0,78 a 0,90 μm) comparada a uma região em que não ocorrem as absorções, o infravermelho de ondas curtas (1,56 a 1,65 μm), banda 11 do MSI, pela fórmula:

$$\text{NDII} = (\text{B8} - \text{B11}) / (\text{B8} + \text{B11})$$

Quanto ao estado de senescência da vegetação, utilizou-se o PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) [22] que consiste na subtração da banda do azul (0,45 a 0,52 μm), banda 2 do MSI, em relação ao vermelho (0,65 a 0,68 μm) dividido pela banda do vermelho próximo (0,73 a 0,74 μm), banda 6 do MSI, pela fórmula:

$$\text{PSRI} = (\text{B2} - \text{B4}) / (\text{B6})$$

2.6. Levantamento aerofotogramétrico da área de estudo

No terreno da área de estudo, foram demarcados 27 pontos de apoio (GCP – *Ground Control Points*) artificiais homogêneamente distribuídos, dos quais 24 pontos de controle, destinados a permitir os ajustes de georreferenciamento das imagens, bem como 3 pontos de verificação para determinar os erros de precisão e de acurácia dos ajustes posicionais realizados.

No centro de cada ponto de apoio, foram coletadas as coordenadas de latitude, longitude e altitude com um receptor (base e rover) GNSS RTK de marca e modelo Hi-Target V30 Plus, empregando-se a metodologia de posicionamento relativo semicinemático (*stop and go*) [23].

Para o levantamento aerofotogramétrico, empregou-se uma aeronave remotamente pilotada (RPA) de marca e modelo DJI Mavic Pro. O planejamento de vôo foi elaborado no programa Drone Deploy versão 4.136.0, adotando-se velocidade horizontal de 15m/s, altura de 120

metros, bem como sobreposições frontal e lateral de 75% e 65%, respectivamente.

Após autorização de vôo pelo sistema Socilitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Comando da Aeronáutica, a aeronave realizou o trajeto automatizado, registrando 409 imagens.

As imagens produzidas foram processadas no programa *Agisoft Metashape Professional* versão 1.6.2 e, após os ajustes posicionais (Tabela 1), serviram para a geração da nuvem de pontos, do modelo digital de elevação, das curvas de nível e do ortofotomosaico.

Tabela 1. Erros de precisão das imagens após ajustes posicionais com base nas coordenadas planialtimétricas coletadas nos pontos de controle.

Coordenada	Erro (cm)
X	4,34963
Y	11,4977
Z	2,83414
XY	12,293
Total	12,6155

O mapa de declividade da área de estudo foi elaborado com base no modelo digital de elevação original com resolução espacial (*GSD – Ground Sample Distance*) aproximada de 50 (cinquenta) centímetros.

No entanto, para as comparações entre os valores de declividade dos talhões, os elementos pictoriais (*pixels*) do modelo digital de elevação original foram reamostrados para 20 metros pelo método do vizinho mais próximo, objetivando, com isso, alcançar a mesma resolução espacial das bandas espectrais utilizadas dos sensores orbitais.

2.7. Modelagem empregando análise por componentes principais

Para as análises estatísticas foram utilizados os programas JASP versão 0.17.1, Excel versão 2013, sendo a Análise de Componentes Principais realizada no programa Pirouette versão 4.0.

A Análise de Componentes Principais (PCA, do acrônimo em inglês *Principal Components Analysis*) foi empregada com o objetivo de discriminar os talhões em relação ao estágio de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar, ao grau de declividade do terreno, bem como à vulnerabilidade de ocorrência de fogo.

As variáveis estudadas foram os índices espectrais de vegetação (NDVI), de umidade (NDII) e de senescência (PSRI) nas imagens obtidas pelo sensor orbital MSI em 05/08/2020, ou seja, 4 dias antes da ocorrência do fogo.

Tais índices espectrais foram comparados entre si e com os dados de declividade do terreno obtidos no levantamento aerofotogramétrico.

Para tanto, os valores dos parâmetros estudados (NDVI, NDII, PSRI e declividade) de cada um dos

elementos de imagem (*picture elements – pixels*) dos arquivos *raster* foram convertidos a pontos amostrais em arquivos vetoriais.

Em seguida, os arquivos vetoriais foram recortados pelas máscaras dos polígonos envolventes de cada um dos 7 (sete) talhões (A-F) da área de estudo.

Para a modelagem, utilizou uma matriz de dados formada por 884 linhas correspondentes aos valores de cada ponto amostral e de 4 (quatro) colunas referentes aos parâmetros estudados (NDVI, NDII, PSRI e declividade).

Durante o pré-processamento, adotou-se o autoescalamento, ou seja, a matriz de dados foi centrada na média dos valores subtraindo-se o valor de cada elemento da matriz da média de cada variável (coluna) e, em seguida, foi normalizada pelo desvio padrão dividindo-se o valor de cada elemento centrado na média pelo desvio padrão da variável.

O autoescalamento permite que todas as variáveis possam exercer influências equitativas nos resultados além de torná-las adimensionais, ou seja, passam a ter a mesma variância [24].

Desse modo, a PCA pode descrever, em termos geométricos das componentes principais, a covariância das variáveis (no presente caso, a NDII, NDVI, PSRI e declividade) usando o menor número de autovetores.

O novo subsistema consiste, então, dos eixos das componentes principais, sendo as coordenadas das amostras nesses novos eixos denominados de *scores*.

Como cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais, os coeficientes dessas variáveis (ou seja, os autovetores) são chamados de pesos (*loadings*) [25].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista o lapso temporal transcorrido entre a data do fato (09/08/2020) e a data de requisição de exame pericial (21/09/2020), a área de estudo era ocupada por plantação de cana de açúcar em fase de brotação e estabelecimento, na qual não foram observados vestígios aparentes de carbonização resultantes de ação ígnea.

Todavia, a composição falsa-cor R12G8AB4 das bandas espectrais do sistema sensor óptico MSI dos satélites da missão Sentinel 2, registradas em 05/08/2020 (Sentinel 2B) e em 10/08/2020 (Sentinel 2A), revelaram mudanças nos padrões de reflectância dos alvos terrestres, as quais eram compatíveis com cicatriz de fogo restrito à integralidade do talhão identificado como A (Figura 2).

Em consonância com tais imagens, constavam no banco de dados de queimadas do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) dois focos de temperatura anômala de superfície terrestre inseridos na poligonal definida pela área atingida pelo fogo, com data de ocorrência em 09/08/2020 e horários de 04:22:39 e 05:18:00, registrados, respectivamente, pelo sensor termal *Visible*

Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) dos satélites NOAA-20 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e S-NPP (*Suomi-National Polar-orbiting Partnership*).

O processo de maturação da cana-de-açúcar consiste em alterações fisiológicas que envolvem a formação de açúcares nas folhas e seu deslocamento e armazenamento nos colmos, sendo que no campo os colmos são tidos como maduros e economicamente aptos à colheita quando apresentam acúmulo de sacarose mínimo de 13,5% [26].

Logo, quando a cana-de-açúcar atingida pelo fogo se encontra em fase de maturação adequada para o corte, a vantagem econômica auferida pelo produtor fragiliza a hipótese de incêndio acidental ou provocado por terceiros.

Embora a falta de preservação do local tenha prejudicado a realização de análises refratométricas dos teores de sacarose dos colmos como indicativo da viabilidade econômica da cana-de-açúcar atingida pelo fogo, a imagem formada pela composição falsa-cor R12 G8A B4 das bandas espectrais do sistema sensor óptico MSI do satélite Sentinel 2B registrada em 15/08/2020 revelaram comportamento espectral da superfície terrestre compatível com conversão da cobertura vegetal em solo exposto (Figura 2).

Dessa forma, evidencia-se que os talhões de cana-de-açúcar atingidos pelo fogo foram colhidos contemporaneamente aos demais talhões adjacentes não atingidos.

As operações de colheita de cana-de-açúcar consistem no corte e carregamento, no transporte e na recepção da matéria-prima, podendo ocorrer por três subsistemas distintos: manual, semimecanizado e mecanizado [27].

Desde a implantação da cultura de cana-de-açúcar no Brasil pelos holandeses a partir de 1530, nos estados de Pernambuco, Alagoas e Bahia [28], as operações de corte dos colmos e carregamento em veículos de transporte eram realizadas pelo subsistema manual [29].

O sistema semimecanizado, caracterizado pelo uso de carregadoras de cana que substituem o carregamento manual, iniciou-se no Brasil na primeira metade da década de 1950, sendo realizado em topografia com declividade de até 25%. Na mesma época, a instalação nas usinas de sistemas de limpeza por via úmida possibilitou o uso do fogo como método despalhador [28].

Já o sistema mecanizado se iniciou no Brasil entre os anos de 1972 a 1976, em áreas de cultivo declividade até 17%. Porém, foi a partir do final de década de 1990 que questões relacionadas à escassez de mão-de-obra e à redução de custos, bem como aos impactos das queimadas sobre a saúde humana e o meio ambiente impuseram a necessidade de substituição gradual pelo modelo de colheita mecanizada com emprego de colhedoras e sem a queima prévia [29].



Figura 2. Comparação das composições falsa-cor R12G8AB4 da área de estudo nas datas de 05, 10 e 15 de agosto de 2020 evidenciando mudanças nos padrões de refletância da superfície terrestre compatíveis com incidência de fogo seguida de colheita da cana-de-açúcar atingida.

É certo que a colheita mecanizada de cana crua deixa espessa camada de palhço (palhas e pontas de colmos) sobre o solo que equivale a cerca de 1/5 da massa total da cana [30], permitindo que sejam realizadas as etapas do manejo cultural similares ao sistema de plantio direto [31].

A manutenção do palhço de cana-de-açúcar interfere na incidência de radiação solar no solo, promovendo alterações microclimáticas que resultam na diminuição da temperatura, no aumento da umidade e na mitigação dos processos erosivos, bem como favorece a incorporação de matéria orgânica no solo, a proliferação dos inimigos naturais das pragas da cana-de-açúcar e reduz o desenvolvimento de ervas daninhas [32].

Por outro lado, a deposição e a manutenção de palhada sobre a superfície do solo, mesmo contribuindo com a sua conservação, podem causar problemas relacionados ao manejo da cultura [33], vindo a influenciar negativamente a brotação, emergência e crescimento das variedades de cana-de-açúcar disponíveis atualmente e que foram desenvolvidas em sistema de cana queimada [34].

Os restos vegetais que permanecem no solo dificultam os tratamentos culturais, sendo que não promovem vantagens estatisticamente significativas na produção de colmos industrializáveis, nos teores de sacarose e nas características agrônômicas da cana-de-açúcar quando se compara aos tratamentos de queimar a cana antes da colheita, de colher a cana e queimar o palhço remanescente, bem como ao de retirar o palhço da parcela [35].

Além disso, em condições de manutenção de palhada, verifica-se baixa taxa líquida de mineralização de nitrogênio no período de um ano agrícola [36].

Não obstante, dificultam a execução de controle seletivo de plantas daninhas e ocasionam incremento nas populações de pragas que se abrigam e multiplicam sob a palhada [37].

Admitindo a hipótese de que a incidência de fogo na área de estudo ocorreu de modo acidental ou provocado pela ação de terceiros e que, em razão disso, a cana-de-açúcar atingida ainda não havia alcançado estágio de maturação satisfatório, a retirada do material resultante poderia ter sido motivada pela necessidade de mitigar os prejuízos financeiros e de adotar medidas de preparação do solo para o início de um novo cultivo.

A 2ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente do Tribunal de Justiça do Estado de São Paulo tem firmado jurisprudência no sentido de que a colheita da cana-de-açúcar atingida pelo fogo não representa, por si só, forma de aproveitamento econômico apto a inferir ter sido a queimada intencionalmente causada pelo produtor [38], sobretudo em função de que o artigo 39, *caput*, do Decreto-Lei 3.855/1941, veda a recusa no recebimento do produto da colheita sob pena de indenização por perdas e danos [39].

Embora decisões originadas no âmbito de processos cíveis visando a desconstituição de autuações administrativas, as eventuais repercussões na esfera da responsabilização criminal exigem o avanço da Criminalística no sentido de capacitar a prova pericial para avaliar, com maior rigor científico, a hipótese de

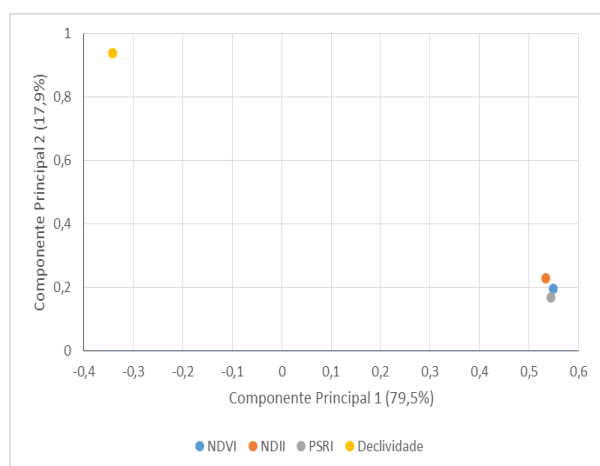
aplicação intencional do fogo no plantio de cana-de-açúcar.

Nesse contexto, a análise estatística multivariada pode oferecer ferramentas, dentre as quais se destaca a PCA, viáveis a tratar e extrair informações relevantes do conjunto de dados.

A PCA consiste na manipulação matemática da matriz de dados com o objetivo principal de representar a variação presente nos parâmetros objetos do estudo usando um número pequeno de fatores, reduzindo, assim, a dimensionalidade dos dados.

Nos resultados de PCA a partir dos índices espectrais e da declividade, duas componentes principais (PC1 e PC2) representaram 97% da variância dos dados originais, podendo ser utilizadas para verificar semelhanças e diferenças dentro do conjunto amostral proveniente dos talhões antes da ocorrência do fogo (05/08/2020).

A Figura 3A mostra o gráfico de pesos para as duas primeiras componentes principais. Geometricamente, os pesos definem cada componente principal e correspondem aos cossenos dos ângulos das componentes principais em relação às variáveis originais [40].



No gráfico dos pesos, observa-se a relação entre as variáveis. A partir da disposição das variáveis ao longo de PC1, que modela 79,5% da variância da matriz de dados, verificou-se que as variáveis NDVI, PSRI e NDII apresentam o maior peso, contribuindo mais para a PC1, refletindo a maior variabilidade desta propriedade ao longo dos talhões. Por outro lado, a declividade tem um peso negativo elevado na componente PC1.

A segunda componente principal (PC2) explicou 17,9% da variância total dos dados, sendo a variável declividade a de maior peso na discriminação dos pontos amostrais provenientes dos diferentes talhões.

A Figura 3B evidencia o gráfico dos escores para as duas primeiras componentes principais, indicando as projeções dos pontos amostrais no espaço das componentes principais.

Nota-se que os índices espectrais calculados para as imagens obtidas na data de 05/08/2020, ou seja, 4 (quatro) dias antes da incidência do fogo, não foram suficientes a discriminar significativamente o talhão A dos demais (B a G).

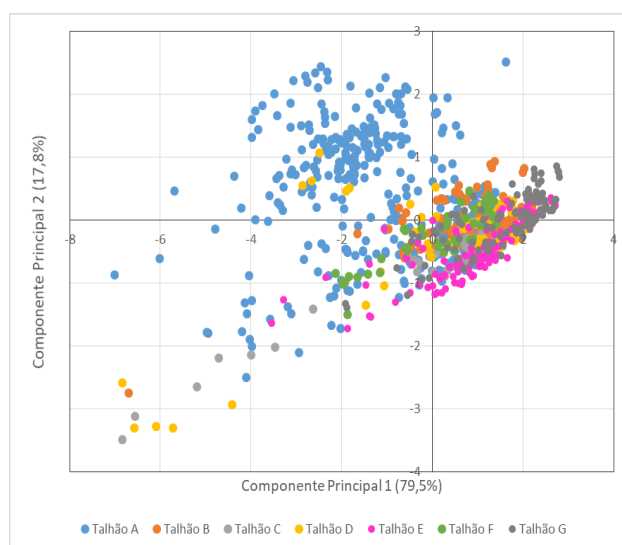


Figura 3. Gráfico dos pesos da componente principais (PC1 e PC2) para as quatro variáveis estudadas (NDVI, PSRI, NDII e declividade) (A) e gráfico dos escores das componentes principais (PC1 e PC2) para os talhões (A-G) com os dados autoescalados.

No decorrer do período de maturação dos colmos e florescimento da cultura são observados acentuados incrementos da área foliar e de crescimento da planta, no entanto o processo de maturação promove o decréscimo da capacidade fotossintética [41].

Concomitantemente à diminuição da atividade fotossintética, há um acúmulo de matéria seca com grande parte das folhas entrando em senescência, cuja intensidade depende das condições climáticas [42].

Além disso, na fase de maturação, o suprimento restrito de água conduz a um conteúdo de umidade da

bainha entre 45% e 65% [43] que induz à conversão do total de açúcares para sacarose recuperável.

Logo, as alterações fenológicas observadas ao longo do processo de amadurecimento da cana-de-açúcar e que se refletem em melhores condições de aproveitamento econômico afetam consideravelmente os teores de verdor, de umidade e de senescência.

Por essa razão, a inexistência de diferenças significativas entre os valores dos índices espectrais (NDVI, NDII e PSRI) entre o talhão A e os demais talhões (B a G) permitem inferir estarem todos em condições de verdor, de umidade e de senescência

semelhantes para a colheita, a qual ocorreu entre os dias 10 e 15/08/2020

Contudo, a variável declividade distinguiu significativamente os pontos amostrais do talhão A em relação aos demais talhões, conforme apontam os

agrupamentos no quadrante superior esquerdo do gráfico da Figura 3B. O mapa de declividade e o perfil topográfico revelam que a região oeste do talhão A apresenta inclinações consideravelmente maiores que as observadas no restante da área de estudo (Figura 4).



Figura 4. Mapa de declividade e perfil topográfico dos talhões inseridos na área de estudo.

Por se tratar da inclinação do relevo em relação ao plano horizontal [44], a declividade é uma das principais características geomorfológicas limitantes à utilização da mecanização agrícola, pois está intimamente ligada às condições de tráfego, uma vez que afeta a velocidade de deslocamento e a estabilidade das máquinas [45].

A maioria das colhedoras de cana-de-açúcar são projetadas para topografias planas, sendo a declividade um fator limitante à realização segura de atividades agrícolas mecanizadas [46].

Em uma escala de fator decrescente de declividade entre 0 (zero) e 5 (cinco), Ramos [47] atribui notas 2 e 3 para as inclinações alta (9,1 a 12%) e média (6,1 a 9%), classificando-as como ruim e regular, respectivamente.

Quando do emprego das máquinas agrícolas na colheita da cana-de-açúcar, os equipamentos que operam em terrenos inclinados devem se manter alinhados com os sulcos de plantio, sem sofrer escorregamento lateral.

A componente lateral da força peso da colhedora deforma os pneus, provocando desvio de trajetória do

veículo no sentido da declividade. Esse desvio deve ser continuamente corrigido por meio da angulação das rodas efetuado pelo mecanismo de direção.

Com isso, os veículos com direção apenas no eixo dianteiro apresentam escorregamento do eixo traseiro sem possibilidade de correção, o que resulta no desalinhamento da colhedora com a fileira de cana e dificulta o processo de alimentação.

A falta de estabilidade ao tombamento, juntamente com as deficiências de dirigibilidade, limita a utilização das colhedoras de uma fileira a terrenos com declividades inferiores a 12% (para máquinas de pneus) [48].

O tempo despendido com as operações de manobra de colhedoras em áreas declivosas é cerca de 71% maior quando comparados aos tempos de manobra na área plana. Do mesmo modo, as manobras de transbordo em áreas declivosas demandam maior cuidado para evitar o pisoteio ou até mesmo o arranquio das soqueiras devido ao efeito do arraste dos pneus sobre o solo, redundando em maiores tempos de execução em relação a áreas planas [49].

Portanto, a declividade média dos talhões

representa um dos fatores determinantes para o melhor rendimento da colhedora e, por consequência, no consumo de combustível, na medida em que está diretamente relacionada tanto à dificuldade em manter a colhedora na linha de plantio quanto à sincronização com o transbordo.

4. CONCLUSÕES

O talhão de cana-de-açúcar atingido pelo fogo apresentava condições de desenvolvimento e de maturação semelhantes aos talhões adjacentes que foram contemporaneamente colhidos sem a incidência de fogo, de modo que a aplicação intencional do fogo pelo produtor não comprometia seu aproveitamento econômico.

Por estar situado nas porções do terreno com declividade mais acentuada do que os talhões não atingidos, o uso do fogo poderia ter servido como meio facilitador das operações de colheita manual pela eliminação das folhas em face dos prejuízos à dirigibilidade das colhedoras, trazendo vantagem econômica ao produtor e, em razão disso, fragilizando a hipótese de incêndio acidental ou provocado por terceiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N.G. Inman-Bamber; D.M.Smith. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research* **9**,185-202, 2005.
- [2] M.J. Robertson; M.J. Donaldson. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. *Field Crops Research* **55**, 201-208, 1998.
- [3] A.A. Delgado. O efeito da queima nos canaviais. *STAB*, Piracicaba **3(6)**, 45-45, 1985.
- [4] M. Eckardt. *Método manual ou mecanizado da colheita da cana-de-açúcar*: análise de coeficientes técnicos. Dissertação de Mestrado. Área de concentração: Aspectos Socioeconômicos de Sistemas de Agroenergia. Universidade Federal do Tocantins, 2012.
- [5] R.G. Silva. *Manual de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais*. Brasília: IBAMA, 1998.
- [6] O.A.B. Azevedo; A.A. Costa. Responsabilidade civil decorrente dos impactos da queima de palha da cana-de-açúcar sobre a fauna silvestre. *Fórum de Direito Urbano e Ambiental* **12(72)**, 67-79, 2013.
- [7] São Paulo (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. República Federativa do Brasil, 2002.
- [8] São Paulo (Estado). Decreto n. 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. República Federativa do Brasil, 2003.
- [9] Brasil. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. República Federativa do Brasil, 2012.
- [10] Brasil. Decreto n. 2.661, de 8 de julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (código florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. República Federativa do Brasil, 1998.
- [11] Brasil. Decreto n. 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. República Federativa do Brasil, 2008.
- [12] Brasil. Decreto-Lei n. 2.848, de 7 de dezembro de 1940. Código Penal. República Federativa do Brasil, 1940.
- [13] Brasil. Decreto-Lei n. 3.689, de 3 de outubro de 1941. Código de Processo Penal. República Federativa do Brasil, 1941.
- [14] Supremo Tribunal Federal. Habeas Corpus 138.523/ RJ. Rel. Min. Edson Fachin. j. 13/12/2016. Brasília, DF.
- [15] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Programa Queimadas. Banco de Dados de Queimadas. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>>. Acesso em 29/10/2022.
- [16] European Space Agency. *Copernicus Open Access Hub*. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. Acesso em 11/04/2023.
- [17] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sentinel. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>>. Acesso em 29/10/2022.
- [18] SWIR – Short Wave Infrared RGB Composite. Disponível em: <<https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/swir-rgb/>>. Acesso em 01/11/2022.
- [19] D. Teobaldo; G.M.M. Baptista. Quantificação da severidade de queimadas e da perda de sequestro

- florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física* **9(1)**, 250-264, 2016.
- [20] J.W. Rouse; R.H. Haas; J.A. Schell; D.W. Deering. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. In: Proceeding Of ErtS-1 Symposium. Anais. NASA, United States, 1973.
- [21] M.A. Hardisky; V. Klemas; R.M. Smart. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **49**, 77-83, 1983.
- [22] J.R. Merzlyak; A.A. Gitelson; O.B. Chivkunova; V.Y. Rakitin. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* **106**, 135-141, 1999.
- [23] Brasil. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. *Manual Técnico para Georreferenciamento de Imóveis Rurais*. 2ed. Brasília (2022).
- [24] K.R. Beebe; R.J. Peel; M.B. Seasholtz. *Chemometrics: A practical Guide*, 1998, USA, Ed. John Wiley & Sons, INC.
- [25] M.M.C. Ferreira; A.M. Antunes; M.S. Melgo; P.L.O. Volpe. Quimiometria I: calibração multivariada, um tutorial. *Química Nova* **22(5)**, 724-731, 1999.
- [26] J.A. Horii. Qualidade da matéria-prima, na visão agrícola. *Visão Agrícola* **1(1)**, 91-93, 2004.
- [27] T.C.C. Ripoli. *Ensaio & certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar*. In: L.G. Mialhe. Máquinas agrícolas: ensaios & certificação. Piracicaba: Fundação de Estudos "Luiz de Queiroz", cap.13, p.635-73, 1996.
- [28] T.C.C. Ripoli; M.L.C. Ripoli. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2009.
- [29] G.C. Belardo; J.H.M. Rosa; P.S.G. Magalhães. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar: evolução da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar. In: G.C. Belardo; M.T. Cassia; R.P. Silva. Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar. 1ed. SBEA: Jaboticabal. 608p., 2015.
- [30] O. Lopes. Palhiço. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, **75(1)**, 64-67, 1970.
- [31] A.C. Meyer. Queima das palhadas na plantação de cana. *Brasil Açucareiro* **5(2)**, 97-98, 1957.
- [32] D. Martins; E.D. Velini; C.C. Martins; L.S. Souza. Emergência em campo de dicotiledôneas infestantes em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. *Planta Daninha* **17(1)**, 151-161, 1999.
- [33] V.L. Furlani-Neto; T.C. Ripoli; N.A. Vila Nova. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhiço remanescente de colheita mecânica. *Stab Açúcar, Álcool e Subprodutos* **15**, 24-27, 1997.
- [34] Z.M. Souza; A.C.S. Paixão; R.M. Prado; L.G. Cesarin; S.R. Souza. Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. *Ciência Rural* **35(5)**, 1062-1068, 2005.
- [35] M.I.S. Aude; E. Marchezan; T. Darriva; I.H. Bernardes. Manejo do palhiço da cana-de-açúcar. 1. Efeito na produção de colmos inudustrializáveis e outras características agrônômicas. *Ciência Rural*, Santa Maria **23(3)**, 281-286, 1993.
- [36] P.C.O. Trivelin; R.L. Victoria; J.C.S. Rodrigues. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **30**, 1375-1385, 1995.
- [37] J.F.G. Garcia; E.Grisoto; P.S.M. Botelho; J.R.P Parra; B. Appezzato-da-Glória. Feeding site of the spittlebug *Mahanarva imbriolata* (STÅL) (Hemiptera: Cercopidae) on sugarcane. *Scientia Agricola* **64(5)**, 555-557, 2007.
- [38] Tribunal de Justiça de São Paulo, 2ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente. Ap. 0001440-61.2015.8.26.0210. rel. Des. Paulo Ayrosa. j. 09.08.2018.
- [39] Brasil. Decreto-Lei n. 3.855, de 21 de novembro de 1941. Estatuto da Lavoura Canavieira. República Federativa do Brasil, 1941.
- [40] W.S. Lyra; E.C. Silva; M.C.U. Araújo; W.D. Fragozo; G. Veras. Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais *Química Nova* **33(7)**, 1594-1597, 2010.
- [41] V. Diola; F. Santos. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. *Tecnologias e Perspectivas* **2**, 25-49, 2010.
- [42] F.L.P. Ramme. Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar. Tese de Doutorado. Área de concentração Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável. Universidade de Campinas, 2008.
- [43] A.A. Casagrande. *Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar*. Jaboticabal: FUNEP, 1991.
- [44] T.G. Florenzano. *Introdução à geomorfologia*. In: _____. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de textos, 2008.
- [45] L. Mueller; U. Schindler; W. Mirschel; T.G. Shepherd; B.C. Ball; K. Helming; J. Rogasik; F. Eulenstein; H. Wiggering. Assessing the productivity function of soils: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 601-604, 2010.
- [46] G.R. Gimenes; B.O. Rone; A.F. Silva; L.C. Reis; T.E.S. Reis. Mapping of slopes for the operation of agricultural harvesters in Bandeirantes Municipality

(PR). *Ciências Agrárias*, Londrina, **38(1)**, 97-108, 2017.

[47] C.R. Ramos. *Metodologia para determinação do índice de colheitabilidade para avaliar a colheita mecanizada de cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2016.

[48] O. A. Braunbeck; J.T.A. Oliveira. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia*

Agrícola, Jaboticabal, **26(1)**, 300-308, 2006.

[49] L.N. Corrêa. Otimização de manobras de transbordos na colheita mecanizada de cana-de-açúcar por meio de programa computacional. Dissertação (Mestrado em Agronomia. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2019.