

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS DO PONTAL

**BRUNA APARECIDA SILVA DIAS**



Ituiutaba (MG)

2019

**BRUNA APARECIDA SILVA DIAS**

**MAPEAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Pontal – Área de Concentração: Produção do espaço e dinâmicas ambientais, da Faculdade de Ciências Integradas do Pontal, Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do Título de Mestra em Geografia.

Linha de Pesquisa: Dinâmicas Ambientais

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Jussara dos Santos Rosendo

Ituiutaba (MG)

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

D541m    Dias, Bruna Aparecida Silva, 1993-  
2019        Mapeamento da cana-de-açúcar em Minas Gerais [recurso  
             eletrônico] / Bruna Aparecida Silva Dias. - 2019.

Orientadora: Jussara dos Santos Rosendo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-graduação em Geografia do Pontal.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.615>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Geografia. 2. Cana-de-açúcar - Minas Gerais. 3. Cana-de-açúcar -  
Manejo. 4. Geoprocessamento. I. Rosendo, Jussara dos Santos, 1980-  
(Orient.) II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
graduação em Geografia do Pontal. III. Título.

---

CDU: 910.1

Gerlaine Araújo Silva - CRB-6/1408

**BRUNA APARECIDA SILVA DIAS**

**MAPEAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MINAS GERAIS**

Dissertação aprovada para obtenção do título de Mestre em Geografia no Programa de Pós-Graduação em Geografia do Pontal – Área de Concentração: Produção do espaço e dinâmicas ambientais – Linha de Pesquisa: Dinâmicas Ambientais, do Instituto de Ciências Humanas do Pontal, Universidade Federal de Uberlândia, pela banca examinadora formada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jussara dos Santos Rosendo, UFU/MG

---

Prof. Dr. Roberto Rosa, UFU/MG

---

Dr. Bruno Schultz, Geoambiente/SP

Ituiutaba, 21 de fevereiro de 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, Ele que me presenteou com verdadeiros anjos para que eu pudesse chamá-los de amigos e que fizeram esse momento ser único em minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia, pelo acolhimento e oportunidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, pela concessão da bolsa de estudos para elaboração e conclusão deste presente estudo.

Aos meus pais, Antonina e Ronilson pelo apoio em todas decisões, pelo incentivo, carinho e amor. Meus irmãos Wesley e Wayme, meu sincero agradecimento!

À minha amiga Bruna Gueiros, pela amizade, carinho, apoio e acolhimento, obrigada por compartilhar comigo tantos momentos de alegria, você é um exemplo de pessoa, espero sempre tê-la por perto.

À minha amiga de república Emilly, por me aguentar nesses três anos de convivência, pelas conversas, desabafos, festas, dificuldades e momentos compartilhados.

Agradeço minha orientadora Jussara Rosendo que ao longo desses seis anos de convívio acadêmico, me ensinou a ser uma pessoa melhor profissionalmente e pessoalmente. Obrigada por estar ao meu lado em todos aqueles momentos que precisei de alguém para conversar e desabafar, pelos puxões de orelha, pelos incentivos e pela paciência para comigo, sei que a partir de agora além de professora e orientadora tornou-se uma grande amiga, jamais esquecerei tudo que fez por mim!

Ao Bruno Schultz pela amizade, paciência, confiança, e por acreditar sempre no meu potencial, a ti, meu sincero agradecimento por todos ensinamentos, pelos momentos que compartilhamos no INPE, e pelo suporte dado no decorrer da dissertação mesmo estando à distância fez de tudo para que o melhor resultado fosse apresentado.

Agradeço a Carol da Geoambiente pela ajuda, pela disponibilidade em sanar minhas dúvidas, mesmo não a conhecendo pessoalmente, meu muito obrigada.

Ao Roberto Rosa, pelas inúmeras contribuições no decorrer do mestrado, e por aceitar compor a banca examinadora.

Ao Roberto Castanho pelas contribuições na defesa do projeto e qualificação.

À minha companheira de laboratório Laíza Brumano, pelos momentos de trabalho e por viagens compartilhadas.

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Geografia do Pontal (PPGEP), em especial, aos professores Leda Miyazaki, Maria Angélica Magrini, Rildo Costa, Roberto Rosa e Gersa Gonçalves. Aos professores externos Sérgio Moreno Redón e João Osvaldo.

Aos colegas da terceira turma do PPGEP.

À toda equipe da coordenação da Pós-graduação em Geografia do Pontal (PPGEP).

À Jahynne Martins Salvador pela disponibilidade ao realizar a revisão ortográfica do presente trabalho.

Se hoje sou uma pessoa melhor foi graças a todos vocês, foram peças chaves para meu crescimento, e sem a contribuição de cada um de vocês com certeza não teria chegado até aqui.

*Dedico aos meus pais, por todo amor e carinho  
que recebi durante a elaboração desse trabalho.*

*A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.*

*Nelson Mandela*



## RESUMO

A expansão de culturas como a da cana-de-açúcar tem provocado inúmeras mudanças no uso e cobertura da terra em todo território nacional. Com a crescente demanda por biocombustíveis, em poucos anos, a produção no Brasil passou a liderar o *ranking* mundial, alcançando mais de 10 milhões de hectares plantados em 2016. Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivo principal mapear a área ocupada pela cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais com base nas técnicas de geoprocessamento para o ano de 2017. Os objetivos específicos foram: a) testar técnicas de classificação para o mapeamento da cana-de-açúcar; b) identificar o sistema de colheita da cana-de-açúcar (mecanizada e queimada); c) verificar as áreas de cana-de-açúcar de acordo com a legislação estadual; d) identificar as áreas de conversão do uso da terra em cana-de-açúcar. Para realização da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: imagens do sensor OLI/Landsat 8, dados do microsatélite PROBA-V, imagens-fração geradas pelo MLME, imagens SRTM, dados da plataforma digital do SatVeg, dados de uso e ocupação da terra do IBGE e arquivos vetoriais de Minas Gerais, além de *softwares* como Spring, QGIS e InterImage. Com base nesses dados, os procedimentos metodológicos consistiram no pré-processamento das imagens, classificação automática e validação dos dados. Com relação aos resultados encontrados, foram identificados 837.829 hectares (ha) de cana-de-açúcar, sendo 435.803 ha colhidos pelo sistema mecânico, 95.128 ha com uso do fogo na pré-colheita e 306.898 ha não colhidos no período analisado. Além disso, as áreas ocupadas pela cana-de-açúcar com uso do fogo em áreas de declividade abaixo de 12% foram de 88.414 ha, enquanto que nas áreas superiores a 12% que justificariam o emprego das queimadas foi 6.714 ha. Quanto à conversão das áreas de uso e ocupação da terra para cana-de-açúcar, mais da metade (53%) corresponderam a áreas agrícolas, 21,7% áreas que anteriormente eram pastagens, seguido pelo mosaico de ocupação em área florestal com 71.032 ha (8,5%). A metodologia permitiu obter um índice Kappa de 0,76 e exatidão Global de 0,96, mostrando-se promissora quanto à identificação da cana-de-açúcar, sendo assim, identificar as áreas de cana-de-açúcar, monitorar tanto o sistema de colheita quanto as alterações ambientais, econômicas e sociais garantem a sustentabilidade do cultivo da cana no país.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar, sistema de manejo, imagens multitemporais, conversão de uso e cobertura da terra, geoprocessamento.

## ABSTRACT

The expansion of crops such as sugar cane has led to numerous changes in how to use the land and its coverage throughout the country. With the growing demand for biofuels, in a few years, Brazilian production has started to lead the world ranking, reaching more than 10 million hectares planted in 2016. Thus, the present research had as its main goal to map the area occupied by sugarcane, the sugarcane in the state of Minas Gerais based on geoprocessing techniques for the year 2017. The specific goals were: a) to test classification techniques for the mapping of sugarcane; b) identify the sugarcane harvesting system (mechanized and burned); c) verify the areas of sugarcane in accordance to the state legislation; d) identify the areas of conversion of land use in sugarcane. In order to carry out the research, the following materials were used: OLI / Landsat 8 images, PROBA-V microsatellite data, MLME generated fraction images, SRTM images, SatVeg digital platform data, land use data and land cover IBGE and vector files from Minas Gerais, as well as software such as Spring, QGIS and InterImage. Based on these data, the methodological procedures consisted of image preprocessing, automatic classification and data validation. Regarding the results found, 837,829 hectares (ha) of sugarcane were identified, of which 435,803 ha were harvested by the mechanical system, 95,128 ha with pre-harvest the usage of fire and 306,898 ha not harvested during the analyzed period. In addition, the areas occupied by sugarcane with fire usage in areas of declivity below 12% were 88,414 ha, while in areas greater than 12% that would justify the use of fires was 6,714 ha. As for the conversion of land occupancy and land cover to sugarcane, more than half (53%) corresponded to agricultural areas, 21.7% areas that were previously pastures, followed by the mosaic of occupancy in the forest area with 71,032 ha (8.5%). The methodology allowed to obtain a Kappa index of 0.76 and Global accuracy of 0.96, proving promising as to the identification of sugarcane, thus identifying the areas of sugarcane, monitoring both the environmental system, economic and social changes guaranteeing the sustainability of sugarcane cultivation in the country.

**Keywords:** sugarcane, harvesting mode, multitemporal images, use conversion and land cover, geoprocessing.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Localização da área de estudo: Minas Gerais.....  | 6  |
| Figura 2- Precipitação média anual de Minas Gerais.....   | 11 |
| Figura 3- Biomas que recobrem o estado de Minas Gerais.....   | 12 |
| Figura 4- Declividade de Minas Gerais.....  | 14 |
| Figura 5- Área plantada com cana-de-açúcar por município em Minas Gerais<br>(2016).....   | 19 |
| Figura 6- Estádios fenológicos da cana-de-açúcar.....   | 24 |
| Figura 7- Aptidão e inaptidão hídrica e térmica para a cana-de-açúcar em Minas<br>Gerais.....   | 27 |
| Figura 8 - Comportamento espectral de uma folha em alto vigor vegetativo.....   | 34 |
| Figura 9- Talhão de cana verde em maio (1a) colhido sem fogo em outubro (1b);<br>talhão de cana verde em maio (2a) colhido com fogo em outubro<br>(2b)..... | 36 |
| Figura 10- Bandas do sensor OLI/TIRS do satélite Landsat8.....  | 38 |
| Figura 11 – Sinais de radar transmitido e recebido na missão SRTM.....  | 43 |
| Figura 12- Modelo para geração de composições coloridas em lote.....  | 50 |
| Figura 13- Mosaico das imagens OLI/Landsat8 na composição colorida<br>5r6g4b.....   | 53 |
| Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas na área estudada.....  | 54 |
| Figura 15- Resposta espectral dos componentes: cana-de-açúcar mecanizada (a),<br>cana-de-açúcar verde (b), cana-de-açúcar com uso do fogo (c).....          | 56 |
| Figura 16- Resultado da segmentação de acordo com os parâmetros definidos.....  | 57 |
| Figura 17- Perfil da cana-de-açúcar na série de dados NDVI (SatVeg).....  | 58 |
| Figura 18- Exemplo de um pixel classificado como cana-de-açúcar em Ituiutaba-<br>mg.....  | 59 |
| Figura 19. Mapa de uso e cobertura da terra em Minas Gerais<br>(2000).....  | 62 |
| Figura 20- Mapeamento da cana-de-açúcar em Minas Gerais no ano de 2017.....   | 67 |
| Figura 21- Identificação da cana-de-açúcar em diferentes modos de colheita em<br>imagens OLI/Landsat8.....  | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22- Modos de colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais.....                                     | 73 |
| Figura 23- Cana-de-açúcar e as queimadas em Minas Gerais (2017).....                                    | 76 |
| Figura 24 – Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar em Minas Gerais, ano base 2000..... | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- <i>Ranking</i> dos municípios produtores de cana-de-açúcar de Minas Gerais em 2016.....  | 20 |
| Tabela 2- Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e época de colheita.....   | 26 |
| Tabela 3- Percentual de colheita manual e mecanizada em Minas Gerais (2007-2018).....  | 31 |
| Tabela 4- Contagem das áreas de cana-de-açúcar geradas pelo classificador C4.5.....  | 65 |
| Tabela 5- Matriz de confusão, índice Kappa e Exatidão Global com base em 1500 pontos de referência.....  | 66 |
| Tabela 6- Limiares do índice Kappa.....  | 66 |
| Tabela 7- Sistema de manejo da cana de açúcar (ha) em Minas Gerais (2017).....   | 69 |
| Tabela 8- Área (ha) queimada nos municípios produtores de cana-de-açúcar em Minas Gerais conforme as classes de declividade de 0 a 12% e >12%..... | 75 |
| Tabela 9- Mudanças de uso da terra para cana-de-açúcar em Minas Gerais.....  | 77 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1- Municípios e usinas de cana-de-açúcar em Minas Gerais.....                            | 22 |
| Quadro 2- Pilares e indicadores de sustentabilidade.....  | 31 |
| Quadro 3- Elementos de interpretação de imagens de sensoriamento remoto.....                    | 33 |
| Quadro 4 - Características das bandas do satélite Landsat8.....                                 | 38 |
| Quadro 5- Características e aplicações do sensor MODIS.....                                     | 40 |
| Quadro 6- Características espectrais do satélite PROBA-V.....                                   | 42 |
| Quadro 7- Nível de processamento e descrição dos produtos o satélite PROBA-V.....               | 42 |
| Quadro 8- Características dos dados SRTM.....   | 44 |
| Quadro 9- Imagens do sensor OLI utilizadas referente ao ano de 2017.....                        | 45 |
| Quadro 10- Imagens SRTM utilizadas para recobrir todo estado de Minas Gerais...                 | 47 |
| Quadro 11- Classes de declividade segundo a Embrapa (1987).....                                 | 60 |
| Quadro 12 - Descrição das classes de uso e cobertura da terra em Minas Gerais (IBGE, 2000)..... | 63 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1-Área plantada com cana-de-açúcar em Minas Gerais no período de 2000 a 2016.....                                    | 17 |
| Gráfico 2- Produção de cana-de-açúcar em hectares nas mesorregiões de Minas Gerais (2016).....                               | 18 |
| Gráfico 3- Área plantada com cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (1990-2016).....                           | 21 |
| Gráfico 4 - Colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais em toneladas (Safr 2016/17 e 2017/2018).....                          | 29 |
| Gráfico 5- Área plantada ou destinada à colheita (ha) das principais culturas de Minas Gerais no período de 2000 a 2016..... | 78 |

## LISTA DE SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>AIRS</b>     | <i>Atmospheric Infrared Sounder</i>                                   |
| <b>AMSR-E</b>   | <i>Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS</i>                 |
| <b>AMSU-A</b>   | <i>Advanced Microwave Sounding Unit</i>                               |
| <b>ASTER</b>    | <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> |
| <b>Aw</b>       | Clima tropical com estação seca de inverno                            |
| <b>BONSUCRO</b> | <i>Better Sugarcane Initiative</i>                                    |
| <b>CANASAT</b>  | Monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite               |
| <b>CCT</b>      | Corte, Carregamento e Transporte                                      |
| <b>Cwa</b>      | Clima temperado úmido com inverno seco e verão quente                 |
| <b>Cbw</b>      | Clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado              |
| <b>CENPES</b>   | Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello |
| <b>CERES</b>    | <i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>                   |
| <b>CNA</b>      | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil                      |
| <b>CNES</b>     | <i>Centre National D'études Spatiales</i>                             |
| <b>CO</b>       | Monóxido de Carbono   |
| <b>CONAB</b>    | Companhia Nacional de Abastecimento                                   |
| <b>COPAM</b>    | Conselho Estadual de Política Ambiental                               |
| <b>CTC</b>      | Centro de Tecnologia Canavieira                                       |
| <b>DPI</b>      | Divisão de Processamento de Imagens                                   |
| <b>DRS</b>      | <i>Data Reception Station</i>   |
| <b>EMBRAPA</b>  | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                           |
| <b>ESALQ</b>    | Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz                        |
| <b>ETM+</b>     | <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>                                  |
| <b>EOS</b>      | <i>Earth Observing System</i>   |
| <b>ESA</b>      | <i>European Space Agency</i>  |
| <b>EUA</b>      | Estados Unidos da América   |
| <b>EVI</b>      | <i>Enhanced Vegetation Index</i>                                      |
| <b>FAO</b>      | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>        |
| <b>GBEP</b>     | <i>Global Bioenergy Partnership</i>                                   |
| <b>GDAI</b>     | <i>Geospatial Data Abstraction Library</i>                            |
| <b>GNV</b>      | Gás Natural Veicular  |



|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>GNU GPL</b>        | <i>GNU General Public License</i>   |
| <b>GHz</b>            | Giga-Hertz  |
| <b>GRASS</b>          | <i>Geographic Resources Analysis Support System</i>                                   |
| <b>HSB</b>            | <i>Humidity Sounder for Brazil</i>  |
| <b>IAC</b>            | Instituto Agronômico de Campinas  |
| <b>IBGE</b>           | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                                       |
| <b>IBM Brasil</b>     | <i>International Business Machines Brasil</i>   |
| <b>ICMS</b>           | Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços |
| <b>INPE</b>           | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais   |
| <b>LAPIG</b>          | Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento                            |
| <b>MG</b>             | Minas Gerais  |
| <b>MIRS</b>           | <i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>  |
| <b>MLME</b>           | Modelo Linear de Mistura Espectral  |
| <b>MMA</b>            | Ministério do Meio Ambiente   |
| <b>MODIS</b>          | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>                                  |
| <b>MOPITT</b>         | <i>Measurements of Pollution in the Troposphere</i>                                   |
| <b>MP</b>             | Material Particulado  |
| <b>NASA</b>           | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>                                  |
| <b>NDVI</b>           | <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>   |
| <b>NGA</b>            | <i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>  |
| <b>NIR</b>            | Infravermelho Próximo   |
| <b>NO<sub>x</sub></b> | Óxidos de Nitrogênio  |
| <b>OBIA</b>           | <i>Object-based Image Analysis</i>  |
| <b>OLI</b>            | <i>Operational Land Imager</i>  |
| <b>ONU</b>            | Organização das Nações Unidas   |
| <b>OSGeo</b>          | <i>Open Source Geospatial Foundation</i>  |
| <b>PIB</b>            | Produto Interno Bruto   |
| <b>PROALCOOL</b>      | Programa Nacional do Alcool   |
| <b>PROBIO</b>         | Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade                        |
| <b>PROBA-V</b>        | <i>Project for On-Board Autonomy-Vegetation</i>                                       |
| <b>QA</b>             | <i>Quality Assurance</i>  |
| <b>RF</b>             | <i>Random Forest</i>  |
| <b>RIDESA</b>         | Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro                   |

|                |  |
|----------------|--|
| <b>RJ</b>      | Rio de Janeiro   |
| <b>SatVeg</b>  | Sistema de Análise Temporal da Vegetação                                 |
| <b>SEAPA</b>   | Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento            |
| <b>SERE</b>    | Sensoriamento Remoto   |
| <b>SIAMIG</b>  | Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool no Estado de Minas Gerais |
| <b>SIDRA</b>   | Sistema IBGE de Recuperação Automática                                   |
| <b>SIG</b>     | Sistema de Informação Geográfica   |
| <b>SPOT</b>    | <i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>                          |
| <b>SRTM</b>    | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>                                  |
| <b>SWIR</b>    | Infravermelho de ondas curtas  |
| <b>TECGRAF</b> | Instituto Tecgraf de Desenvolvimento de Software Técnico-Científico      |
| <b>TIRS</b>    | <i>Thermal Infravermelho Sensor</i>                                      |
| <b>TMAP</b>    | Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba                                       |
| <b>TOA</b>     | <i>Top Of Atmosphere</i>   |
| <b>TOC</b>     | <i>Top Of Canopy</i>   |
| <b>UDOP</b>    | União dos Produtores de Bioenergia                                       |
| <b>UFAL</b>    | Universidade Federal de Alagoas  |
| <b>UFG</b>     | Universidade Federal de Goiás  |
| <b>UFTM</b>    | Universidade Federal de Mato Grosso                                      |
| <b>UFPI</b>    | Universidade Federal do Piauí  |
| <b>UFPR</b>    | Universidade Federal do Paraná   |
| <b>UFRRJ</b>   | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro                             |
| <b>UFS</b>     | Universidade Federal de Sergipe  |
| <b>UFSCar</b>  | Universidade Federal de São Carlos                                       |
| <b>UFV</b>     | Universidade Federal de Viçosa   |
| <b>UFPE</b>    | Universidade Federal de Pernambuco                                       |
| <b>USP</b>     | Universidade de São Paulo  |
| <b>UNICA</b>   | União da Indústria de Cana-de-açúcar                                     |
| <b>USGS</b>    | <i>United States Geological Survey</i>                                   |
| <b>UTM</b>     | <i>Universal Transverse Mercator</i>                                     |
| <b>WRS</b>     | <i>Worldwide Rederence System</i>  |
| <b>WGS84</b>   | <i>World Geodetic System 1984</i>  |

## SUMÁRIO

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>   | <b>x</b>         |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>  | <b>xii</b>       |
| <b>LISTA DE QUADROS .....</b>   | <b>xiii</b>      |
| <b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>  | <b>xiv</b>       |
| <b>LISTA DE SIGLAS.....</b>   | <b>xv</b>        |
| <br><b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <br><b>.....</b> |
| 1.1 Localização da área de estudo .....                                   | 5                |
| 1.2 Caracterização física de Minas Gerais .....                           | 9                |
| <br><b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                 | <br><b>15</b>    |
| 2.1 A cana-de-açúcar.....   | 15               |
| 2.2 Colheita da cana-de-açúcar .....                                      | 28               |
| 2.3 Sensoriamento remoto aplicado a cana-de-açúcar .....                  | 32               |
| <br><b>3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>                | <br><b>45</b>    |
| <b>3.1 MATERIAIS.....</b>   | <b>45</b>        |
| 3.1.1 Dados cartográficos.....  | 45               |
| 3.1.2 Equipamentos .....  | 48               |
| 3.1.3 Softwares.....  | 48               |
| <br><b>3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>                          | <br><b>49</b>    |
| 3.2.1 Mapeamento da cana-de-açúcar .....                                  | 54               |
| 3.2.2 Mapeamento do sistema de colheita da cana-de-açúcar.....            | 55               |
| 3.2.3 Validação do mapa temático da cana-de-açúcar .....                  | 58               |
| 3.2.4 Verificação das áreas mapeadas conforme legislação estadual .....   | 59               |
| 3.2.4 Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar .....       | 60               |
| <br><b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                               | <br><b>65</b>    |
| 4.1 Avaliação da classificação da cana-de-açúcar .....                    | 65               |
| 4.2 Avaliação do sistema de manejo da cana-de-açúcar.....                 | 68               |
| 4.3 Avaliação da cana-de-açúcar e as queimadas conforme declividade ..... | 74               |
| 4.4 Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar .....         | 77               |
| <br><b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                  | <br><b>81</b>    |
| <br><b>6. REFERÊNCIAS .....</b>   | <br><b>83</b>    |

## 1. INTRODUÇÃO

No setor agrícola, uma das culturas de grande expressão, tanto no mercado nacional quanto internacional, é a da cana-de-açúcar, considerada a terceira maior cultura agrícola do Brasil em área plantada. Dados do SIDRA/IBGE (2016) mostram que a cultura alcançou, em 2016, um total de 10.245.102 ha em área plantada, o que representa 1,2% do território brasileiro, perdendo apenas para a soja e o milho, com 33.309.865 ha (3,9%) e 16.039.474 ha (1,8%), respectivamente. Já o estado de Minas Gerais ocupava, nesse mesmo ano, o terceiro lugar na moagem da cana-de-açúcar e na produção do etanol e o segundo lugar na produção de açúcar, responsável por 15,5% do PIB (Produto Interno Bruto) agrícola do estado no mesmo ano. (AGÊNCIA MINAS, 2016).

Uma das principais finalidades da produção da cana-de-açúcar é a geração do açúcar e biocombustíveis, esse último inserido no mercado em razão da grande instabilidade do mercado petrolífero nos anos 90. Numa visão sustentável de “energia limpa” com baixas emissões de gases poluentes causadores do efeito estufa, os biocombustíveis foram vistos como a solução para dependência energética em relação aos combustíveis fósseis. Os dados do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2013) comprovaram a eficácia o etanol em relação à gasolina ou ao diesel em termos de emissão de poluentes, no ano de 2012 foi verificado que 74% das emissões de CO (Monóxido de Carbono) eram advindos da gasolina, 14% do diesel, 11% do etanol e apenas 1% do GNV (Gás Natural Veicular). A emissão do NO<sub>x</sub> (Óxidos de Nitrogênio) pelo diesel representa 91%, 7% da gasolina, 1% etanol hidratado e 1% GNV. Quanto ao MP (Material Particulado), 96% provém da combustão do diesel e 4% da gasolina.

As vantagens dos biocombustíveis são inúmeras, porém, apresentam também uma série de desvantagens, como o rendimento quando comparado à gasolina, aumento das áreas para o cultivo, aumento do consumo de água para irrigação, redução de biodiversidade, dentre outros. Além disso, no processo de produção da cana-de-açúcar, outros fatores podem contribuir no aumento da emissão de gases e partículas, como a prática da queima anterior à colheita. Nesse caso, o setor sucroenergético<sup>1</sup> tem sofrido pressões quanto à melhoria da qualidade ambiental

---

<sup>1</sup> Sucroenergético é uma nova terminologia utilizada para definir a atual fase das atividades desenvolvidas pelo setor, que vai muito além da produção do açúcar e do etanol, agora com referência também à bioeletricidade.

no processo de produção da cultura, principalmente em relação à queima, cuja tendência será sua eliminação total, por isso realizada nessa pesquisa a averiguação do sistema de colheita. Quanto ao monitoramento e levantamento de dados relativos à agricultura, os dados de sensoriamento remoto nos fornecem informações rápidas, confiáveis e muitas vezes sem nenhum custo, como imagens da série Landsat, *Sentinel*, *Cbers* e *ResourceSat*. Com base na aquisição desses dados, medidas públicas e privadas podem ser tomadas visando melhorar e aprimorar as estimativas de área e de produção, incentivos, investimentos e subsídios, não apenas para a cana-de-açúcar, mas de maneira geral para qualquer outra cultura agrícola ou demais usos e aplicações.

A observação da superfície terrestre, por meio do sensoriamento remoto, é realizada mediante o uso de satélites que orbitam o planeta, neles estão presentes sensores no qual captam dados de vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético e logo os transformam em informações que vão ser analisadas e processadas conforme o interesse do usuário. De acordo com os autores Rudorff e Moreira (2002), as radiações captadas pelos sensores trazem diversas informações possíveis para identificação e estimativa da área disponível para colheita produção de uma cultura agrícola, sendo notável a aplicabilidade dos sensores remotos no setor.

De 2003 até o ano de 2013, a cana-de-açúcar era monitorada anualmente pelo projeto CANASAT<sup>2</sup>, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujo projeto atuava nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Paraná, e de 2010 a 2013, nos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. No entanto, os dados fornecidos gratuitamente são datados até o ano de 2013, ficando perceptível a necessidade de desenvolver novos métodos que mantenham as informações atualizadas e gratuitas de um produto tão representativo para o país, que na safra 2016/2017 faturou 100 bilhões de reais. (SIAMIG, 2018)

Nesse sentido, as realizações de estudos voltados ao monitoramento da expansão agrícola são primordiais no planejamento da cultura, uma vez que o emprego de ferramentas tecnológicas como os sensores remotos viabiliza ainda mais a estimativa da área disponível para colheita no estado de Minas Gerais. Além disso, a média resolução espacial (6 a 30 metros)

---

<sup>2</sup> Monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite:  
<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>.

permite obter bons resultados, principalmente quando utilizados para mapeamento de grandes áreas agrícolas, como o caso da cana-de-açúcar.

Algumas metodologias bem-sucedidas foram empregadas na estimativa da área com cana-de-açúcar: classificação automática; MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral) utilizado por Mendonça et al. (2011); Aguiar et al. (2009); Mello et al. (2010) interpretação visual (RUDORFF et al. 2005; 2007); NDVI (*Normalized Difference\_Vegetation Index*) empregado nos trabalhos de AGUIAR, (2007), AGUIAR et al. (2009) e PICOLI, et al. (2009), que foram de extrema importância para sua identificação e quantificação. No entanto, aprimorar estas ou desenvolver e testar novas metodologias que apresentem erros mínimos corroboram nos estudos que fazem utilização do sensoriamento remoto.

A pesquisa foi estruturada de forma que o capítulo 1, além da Introdução, apresente os subcapítulos que destacam a justificativa do presente trabalho, que se dá em virtude da crescente expansão do setor sucroenergético em Minas Gerais, sendo a cana-de-açúcar a terceira maior cultura temporária em área plantada no estado. Apresenta, igualmente, os objetivos gerais, específicos, a localização e caracterização da área de estudo.

O Referencial Teórico (capítulo 2) apresenta uma breve caracterização da cana-de-açúcar, bem como a sua história no território brasileiro, principalmente como se deu sua inserção no estado mineiro. Ainda, nesse capítulo, é descrito sobre a colheita da cultura, em qual época quais sistemas são utilizados para colheita. O subcapítulo 2.3 refere-se ao sensoriamento remoto aplicado à cana-de-açúcar, apresenta algumas noções básicas do comportamento espectral da vegetação, atributos que ajudam a interpretar uma imagem de sensoriamento remoto, e como identificar a cana-de-açúcar e o modo de colheita por meio desses elementos. Também, são apresentadas as características principais dos dados de sensoriamento remoto obtidos para desenvolver a pesquisa.

O capítulo 3 aponta os materiais e os procedimentos metodológicos, materiais como: dados cartográficos (imagens OLI/Landsat 8, dados PROBA-V, imagens-fração geradas pelo MLME, imagens SRTM, dados de uso e cobertura da terra de Minas Gerais e malhas digitais da área estuda), equipamentos, e *softwares* como QGis 2.18, InterImage, Spring 5.5 e o *Google Earth Engine*. É descrito, também, todos os procedimentos operacionais que vão desde o pré-processamento até a classificação das imagens.

Os resultados e discussões são mostrados no capítulo 4, nele consta o mapa de cana-de-açúcar em Minas Gerais oriundo da classificação, mapa da colheita da cana-de-açúcar, mapa das áreas de cana-de-açúcar e as queimadas, além das tabelas quantificando e validando os resultados.

Nos anexos é mostrado o passo a passo para obter as imagens OLI/Landsat 8 por meio da plataforma digital da USGS e como realizar o MLME no Spring para identificar a colheita da cana-de-açúcar.

A justificativa deste trabalho foi que a valorização do etanol como fonte alternativa aos combustíveis fósseis, liberação do setor sucroalcooleiro à concorrência internacional e a demanda mundial pelo etanol marcaram a entrada do Brasil no *ranking* dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo, com isso, a expansão das áreas tornou-se inevitável. No entanto, nos últimos anos, associados a mudanças climáticas, o setor passou a demandar maior atenção no planejamento dos cultivos.

Sendo assim, o monitoramento e a estimativa agrícola tornaram-se fundamentais no sistema organizacional de produção do setor agrícola, e, por isso, o sensoriamento remoto tem se apresentado como ferramenta que, além de possuir um caráter multitemporal, é capaz de reduzir a dependência de dados de campo a um baixo custo.

Tendo em vista a importância da cana-de-açúcar na economia do país, tem-se a necessidade de monitorar e estimar a cana-de-açúcar como forma de evitar implicações econômicas ao setor, visando tomar melhores decisões durante todo o processo de cultivo.

A hipótese que permeou o trabalho supõe que: o uso do sensor *Operational Land Imager* (OLI) e o PROBA-V em NDVI, a bordo do Landsat 8, pode ser uma possível alternativa para o mapeamento automático do sistema de colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais; a maior área de concentração da cana-de-açúcar está no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba; os algoritmos de *Random Forest* e C4 apresentam resultados satisfatórios na identificação e na distinção do sistema de colheita da cana-de-açúcar; e a grande parte das áreas identificadas no sistema de colheita com queimadas estão em declividade maior que 12%, e as mecanizadas em áreas menores que 12%, a maioria das áreas convertidas em cana-de-açúcar eram as pastagens.

O principal objetivo da pesquisa é mapear a área ocupada pela cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais com base nas técnicas de geoprocessamento para o ano de 2017. Quanto aos

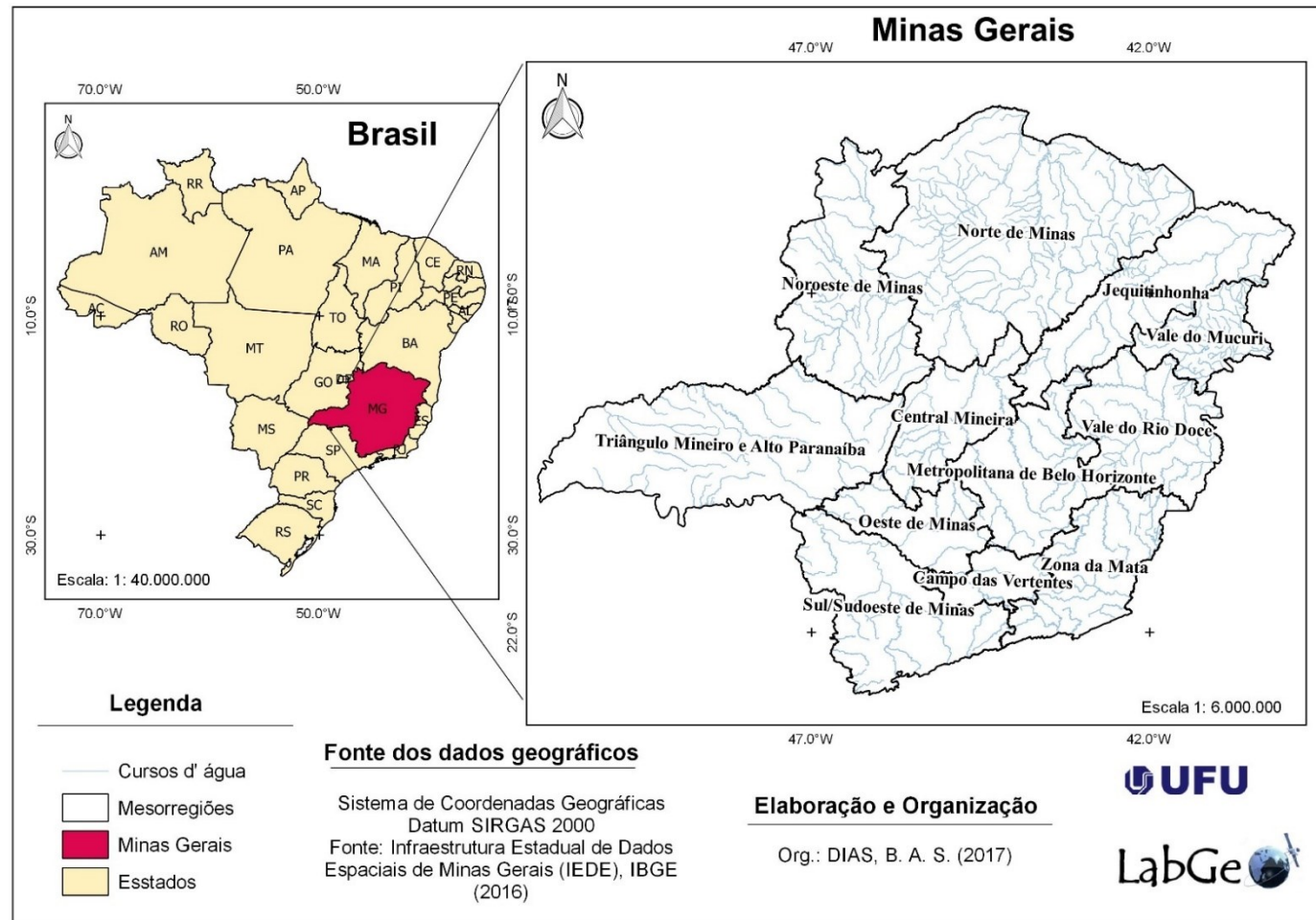
objetivos específicos, estes foram: a) testar técnicas de classificação para o mapeamento da cana-de-açúcar; b) identificar o sistema de colheita da cana-de-açúcar (mecanizada e queimada); c) verificar as áreas de cana-de-açúcar de acordo com a legislação estadual; d) identificar as áreas de conversão do uso da terra em cana-de-açúcar.

### **1.1 Localização da área de estudo**

A área escolhida para ser objeto de estudos da pesquisa é o estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil, seu território ocupa uma área de 588.528 km<sup>2</sup>, é o quarto maior estado de acordo com esse critério e faz divisa com seis estados (São Paulo, Rio de Janeiro, Goiás, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul e Bahia), além do Distrito Federal. Localiza-se entre os paralelos 14°13'58'' e 22°54'00'S do Equador e os meridianos 39°51'32'' e 51°02'35''W de Greenwich, possui 853 municípios distribuídos em 66 microrregiões e 12 mesorregiões (Campo das Vertentes, Central Mineira, Jequitinhonha, Metropolitana de Belo Horizonte, Noroeste de Minas, Norte de Minas, Oeste de Minas, Sul e Sudoeste de Minas, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Vale do Mucuri, Vale do Rio Doce e Zona da Mata). Quanto à população, o IBGE (2018) estimou em 21.226.725 habitantes. Na Figura 1, é mostrada a localização geográfica da área de estudo:



Figura 1- Localização da área de estudo: Minas Gerais



Fonte: Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais de Minas Gerais (IEDE) , IBGE (2016)

A mesorregião Norte é composta por 89 municípios, subdivididos em sete microrregiões (Bocaiúva, Grão Mogol, Janaúba, Januária, Montes Claros, Pirapora e Salinas). A mesorregião do Norte de Minas possui área de 128.454 Km<sup>2</sup>, conhecida pela produção de frutas oriundas dos projetos de irrigação: Jaíba, Pirapora e Vale do Gortuba que movimentam a economia da região, além da agropecuária, indústria e comércio, mais concentrados no polo regional de Montes Claros. A população estimada é de 1,736 milhão de habitantes (IBGE, 2017).

Com área de 50.143 km<sup>2</sup>, população estimada em 731,3 mil habitantes distribuídos em 51 municípios agrupados em cinco microrregiões (Almenara, Araçuaí, Capelinha, Diamantina e Pedra Azul), a mesorregião do Jequitinhonha é uma das mais pobres do estado, caracterizada pela baixa expressão econômica (IBGE, 2017).

Tendo como principais atividades econômicas a agricultura e a pecuária, a mesorregião Noroeste de Minas possui área de 62.381 km<sup>2</sup>, formada por 19 municípios que compõe as duas microrregiões de Paracatu e Unaí, e população de aproximadamente 392,6 mil habitantes segundo estimativa do IBGE (2017).

Conhecida pela agroindústria mais moderna do estado, a mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é considerada uma área de fronteira agrícola. Os principais cultivos comerciais agrícolas são soja, milho e cana-de-açúcar, além da criação do rebanho bovino de alto valor comercial e indústria de fertilizantes. Composta por 66 municípios distribuídos em sete microrregiões (Ituiutaba, Frutal, Uberlândia, Uberaba, Patrocínio, Araxá e Patos de Minas), é a segunda maior mesorregião do estado em área territorial (90.545 km<sup>2</sup>) e em população (2.296.246 habitantes) (IBGE, 2017).

Formada por 30 municípios agrupados em três microrregiões: Bom Despacho, Curvelo e Três Marias, a mesorregião Central Mineira possui área de 31.751 km<sup>2</sup> e população aproximada 466.521 habitantes, sem grande expressão econômica, a agricultura não ganha muito destaque na região, que é conhecida principalmente pelo reservatório de Três Marias (IBGE, 2017).

Com a economia baseada no comércio de pedras semipreciosas, produção agropecuária de baixo valor, a mesorregião do Vale do Mucuri ocupa a área de 20.080 km<sup>2</sup> divididos nas microrregiões de Nanuque e Teófilo Otoni com 23 municípios e população total de aproximadamente 398 mil habitantes (IBGE, 2017).

Composta por 102 municípios agrupados em sete microrregiões: Aimorés, Caratinga, Governador Valadares, Guanhães, Ipatinga, Mantena e Peçanha, a mesorregião do Vale do Rio Doce destaca-se pela indústria siderúrgica na região metropolitana do Vale do Aço (28 municípios ao todo), e pela extração mineral, o setor agropecuário não possui grande expressividade. A população estimada é de 1,6 milhão de habitantes numa área de 41.809 km<sup>2</sup> (IBGE, 2017).

Como centro político-econômico-administrativo de Minas Gerais, a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte é composta por 105 municípios divididos em oito microrregiões: Belo Horizonte, Conceição do Mato Dentro, Conselheiro Lafaiete, Itabira, Itaguara, Ouro Preto, Pará de Minas e Sete Lagoas. A mesorregião tem sua economia baseada principalmente na prestação de serviços, construção civil, mineração e produção industrial. Possui a maior população do estado com aproximadamente 6,5 milhões de habitantes numa área de 39.486 km<sup>2</sup> (IBGE, 2017).

Composta por 44 municípios agrupados em cinco microrregiões (Campo Belo, Divinópolis, Formiga, Piumhi e Oliveira), a mesorregião do Oeste de Minas tem sua economia baseada na indústria, siderurgia, alimentos e têxtil. Com área de 24.043 km<sup>2</sup> e população estimada de 1 milhão habitantes (IBGE, 2017).

Atividade econômica marcada pela prestação de serviços relacionados ao comércio e turismo e a agropecuária, a mesorregião Campo das Vertentes é formada por 36 municípios distribuídos em três microrregiões: Lavras, São João Del-Rei e Barbacena, que ocupam a área de 12.563 km<sup>2</sup> e população com cerca de 581 mil habitantes (IBGE, 2017).

Com área de 35.747 km<sup>2</sup> e população de aproximadamente 2,2 milhões de habitantes, a mesorregião da Zona da Mata mineira é composta por 142 municípios agrupados em sete microrregiões: Cataguases, Ubá, Ponte Nova, Viçosa, Juiz de Fora, Muriaé e Manhuaçu. Sua economia é movimentada principalmente pelo setor de serviços, indústria, agropecuária e turismo (IBGE, 2017).

Composto por 146 municípios agrupados em 10 microrregiões: São Lourenço, Alfenas, São Sebastião do Paraíso, Varginha, Passos, Poços de Caldas, Itajubá, Andrelândia, Santa Rita do Sapucaí e Pouso Alegre, a mesorregião do Sul/Sudeste de Minas tem 49.523 km<sup>2</sup> de área e 2,5 milhões de habitantes, a renda concentra-se nos setores de serviços, indústria e agropecuária (IBGE, 2017).

## 1.2 Caracterização física de Minas Gerais

O relevo do Sudeste é resultado da tectônica de arqueamento, falhamentos e fraturamento que atingiram o escudo brasileiro desde o Mesozoico, tais processos fizeram com que a região apresentasse os mais diversos quadros morfológicos do país, representado pela Serra do Espinhaço em Minas Gerais como um grande conjunto montanhoso cuja altitudes ultrapassam 1.200 metros. Sedimentos do Paleozoico e Mesozoico formaram maciços e blocos resultantes do complexo cristalinos encontrados na Bacia do São Francisco, além de grandes domínios morfoestruturais caracterizados por escarpas e maciços modelados em rochas cristalinas – como o planalto do Sul de Minas, as altas superfícies modeladas em rochas proterozoicas encontradas em Ouro Preto, Ouro Branco, Belo Horizonte, chegando até Diamantina –, e os relevos modelados e rochas sedimentares como a região do São Francisco que compreende a área do Alto São Francisco e estende-se até as serras da Canastra, Babilônia e Vertentes (MOREIRA, 1977).

O estado divide-se em quatro províncias geotectônicas: São Francisco (central de Minas), Tocantins (noroeste-sudeste de Minas), Paraná (oeste-sudoeste) e Mantiqueira (nordeste-sudeste) (SAADI, 1991). Intrinsecamente ligado ao clima e o relevo, o estado conta com cinco grandes bacias hidrográficas: São Francisco (ocupa cerca de 40% das terras do estado, Rio Grande (15%), Paranaíba (12%), Doce (12%) e Jequitinhonha (11%) (Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais, 2002).

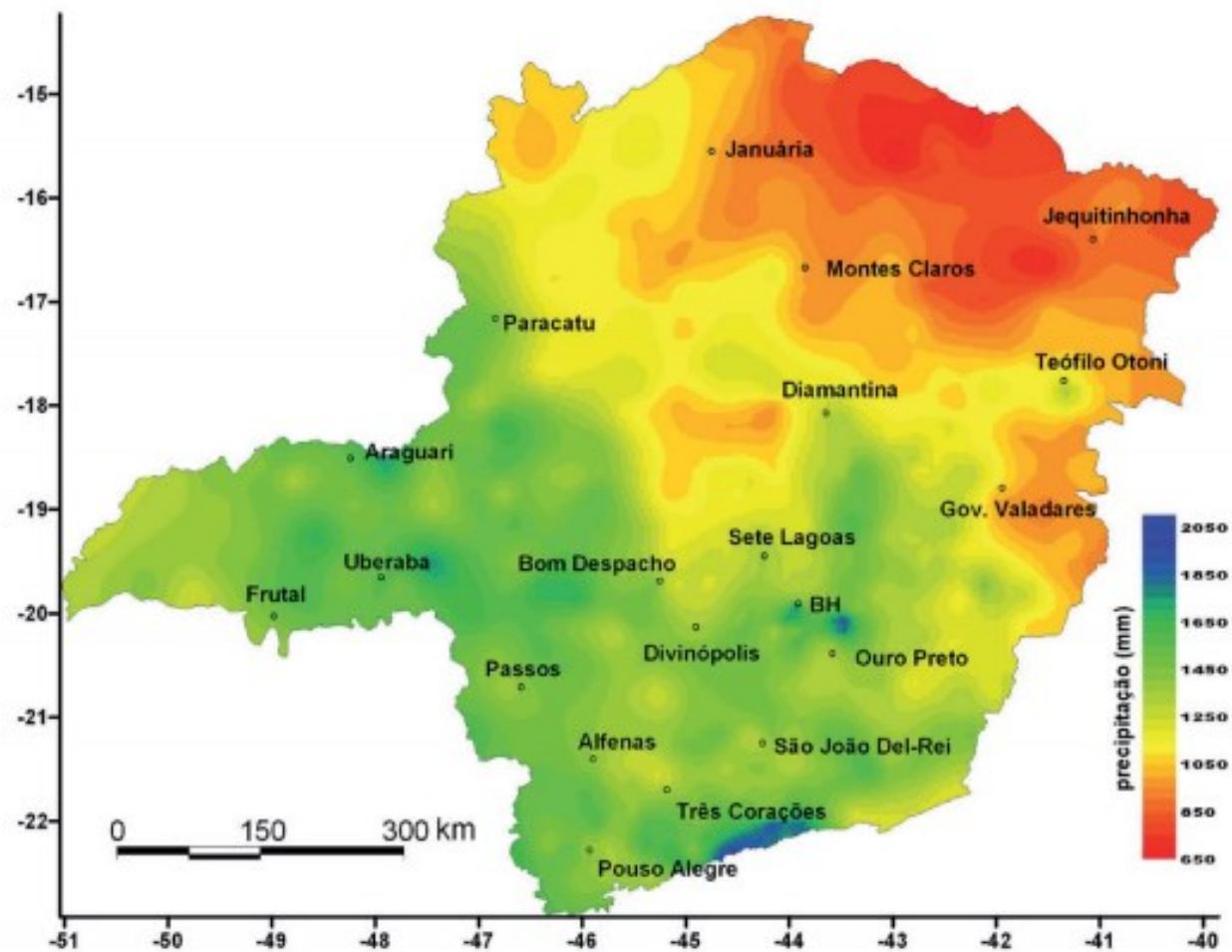
Em linhas gerais, o clima do estado apresenta duas estações bem definidas, uma seca e uma chuvosa. Está em uma zona de transição entre latitudes médias e latitudes baixas, dada pela variação da temperatura no verão e no inverno (NIMER, 1989). Porém, por sua grande extensão territorial e localização, o estado apresenta diferentes domínios morfoclimáticos: no sul e leste do estado o clima pode variar do tropical úmido ao tropical semiúmido, passando pelo tropical de altitude, resultado da influência entre clima e relevo nessas regiões. No Centro, Oeste e no Triângulo Mineiro, apresenta-se clima tropical semiúmido típico, em razão da distância do litoral. E ao norte, por estar mais próxima da Bahia, possui características semelhantes, cujo clima pode ser denominado como clima semiárido (INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS-MG, 2012, p. 11). Vale ressaltar que, além dos fatores citados acima, a posição geográfica, topografia, relevo, continentalidade, maritimidade são alguns dos outros elementos que agem e influenciam o clima da região (NIMER, 1989).

Em função do relevo e da posição geográfica, a precipitação média anual apresenta variações de 650 mm no norte a 2100 mm no sul/sudeste do estado (Figura 2), sendo o mês de janeiro com os maiores índices pluviométricos. Tais informações ganham importância no planejamento, ordenamento territorial e na economia, interferindo diretamente nas atividades industriais, agrícolas e domésticas. (GUIMARÃES et al., 2010).

As principais formações vegetais presentes no estado são: matas pluviais, matas secas, cerrado, campos limpos, caatinga.

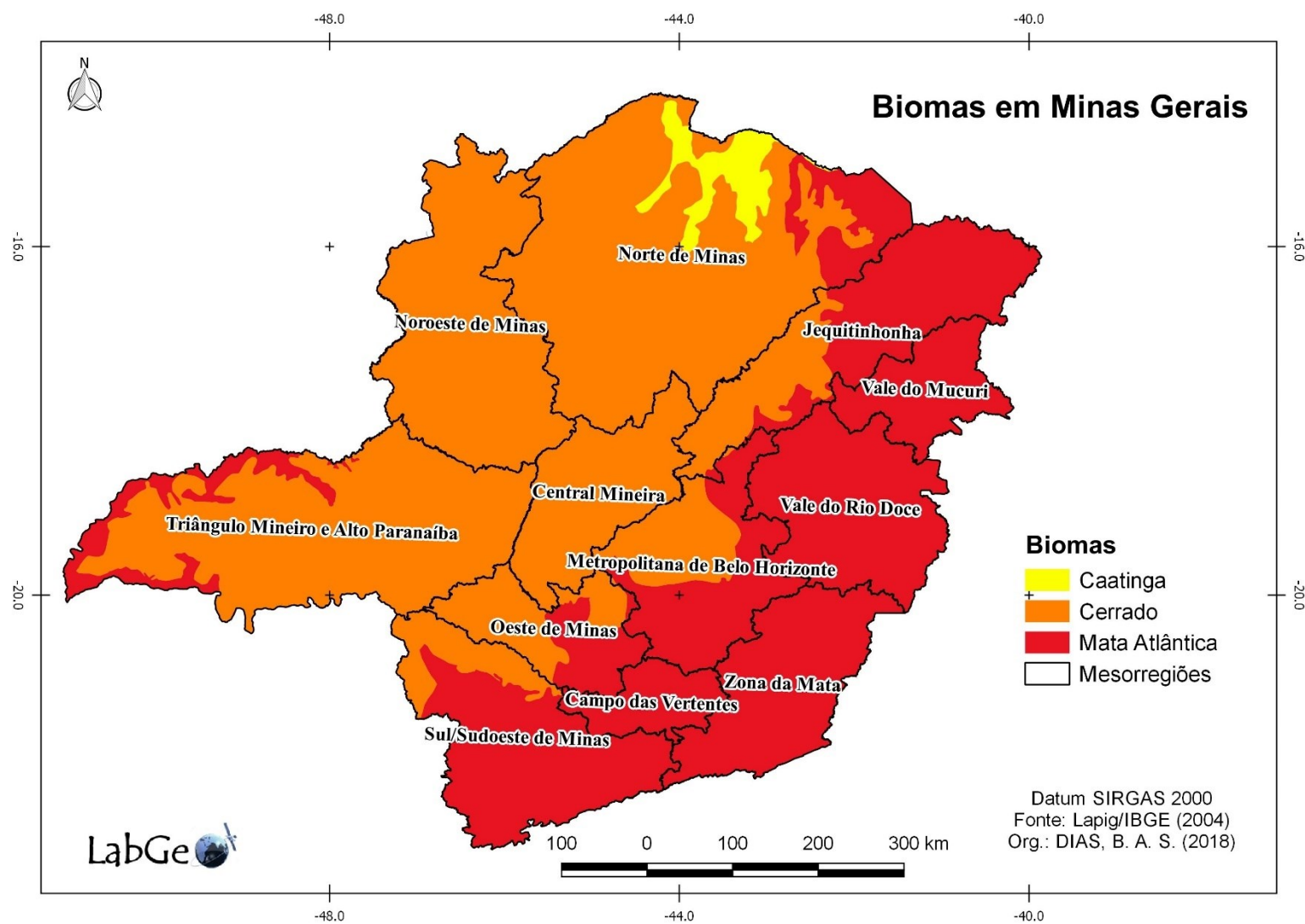
Os biomas predominantes no estado são: Cerrado situado na porção oeste, a Mata Atlântica a leste e a Caatinga mais ao norte e, ocupando 57%, 41% e 2% da área territorial, respectivamente (PROBIO, 2007; 2011; 2012). Na Figura 3, temos as áreas do estado que correspondem aos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, segundo dados do LAPIG/IBGE (2004).

Figura 2- Precipitação média anual de Minas Gerais.



Fonte: Guimarães et al., 2010.

Figura 3- Biomas que recobrem o estado de Minas Gerais



Fonte: LAPIG/IBGE (2004)

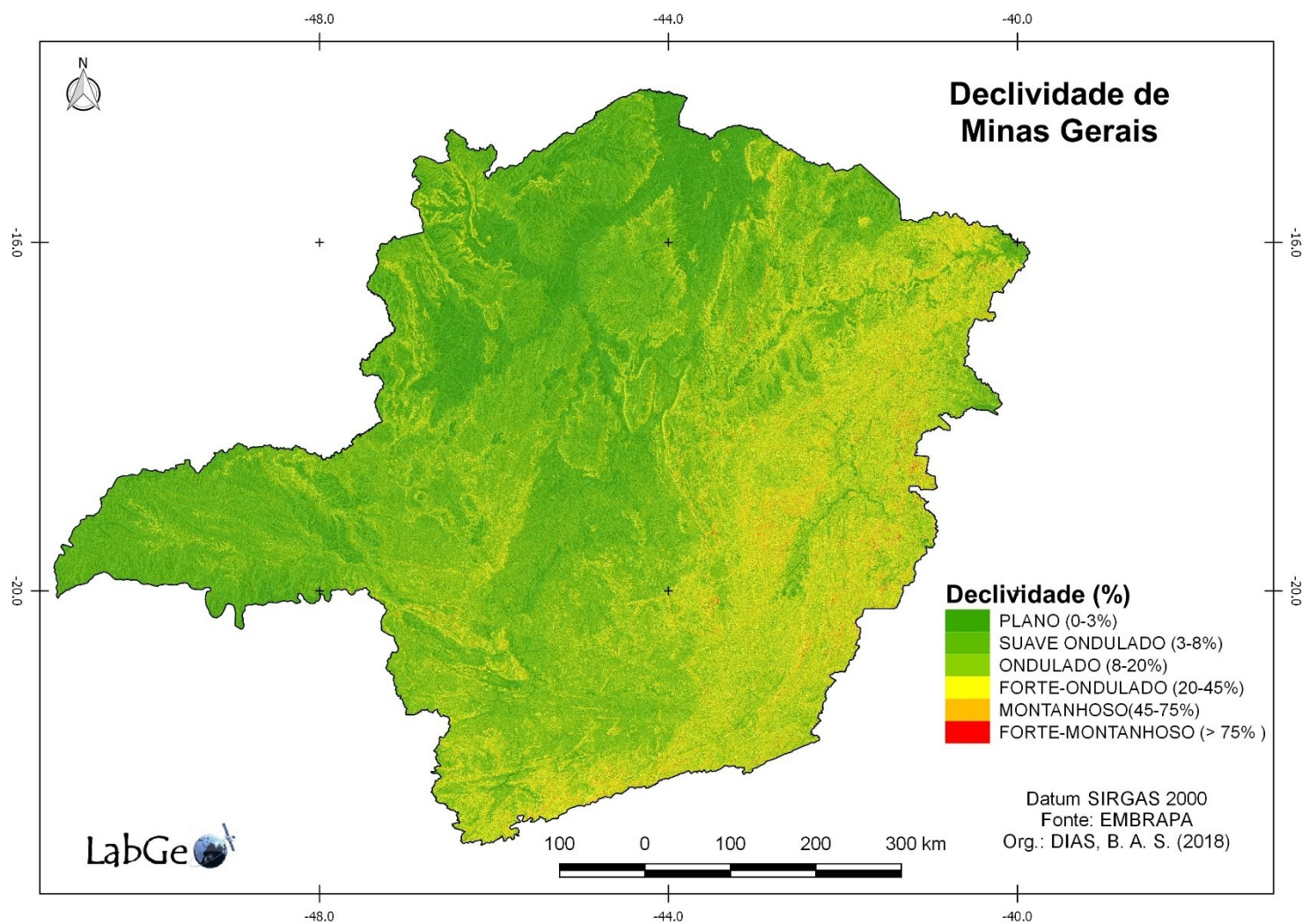
Os solos de Minas Gerais, segundo Amaral et al. (2004), pertencem à classe dos Latossolos, Cambissolos e Podzólicos, predominando os Latossolos Vermelho-Amarelo (25%) e Vermelho-Escuro (Vermelho na nova classificação) (18%), Cambissolos (18%) e Podzólico (Argissolo) Vermelho-Amarelo (10%) e Vermelho-Escuro (Vermelho) (10%), ainda, de acordo com os autores, as terras mineiras dispõem de uma grande quantidade de fertilizantes e corretivos para o desenvolvimento da produção agrícola, dada sua aptidão agrícola.

Esses elementos geográficos tornam-se fundamental para o estudo da cana-de-açúcar, uma vez que seu cultivo depende da combinação da geologia, relevo e clima. Além disso, essas características vão definir a área plantada e a produtividade das maiores mesorregiões produtoras do estado cuja junção desses fatores evidencia sua aptidão agrícola. Por isso, um elemento fundamental é conhecer a declividade da área, pois esta influenciará na definição do tipo de colheita, já que em declividades acima de 12% não é possível a colheita mecânica (COPAM, 2009). Na Figura 4, temos a declividade de Minas Gerais de acordo com as classes definidas pela Embrapa (1979).

Em regiões como o estado de Minas Gerais, a junção de fatores já citados anteriormente como solo, declividade e clima definem o tipo de manejo de uma cultura como a cana-de-açúcar, e a não observação desses aspectos pode acarretar em prejuízos financeiros ao produtor, uma vez que o conhecimento dos atributos físicos do solo facilita as práticas de manejo apropriadas à cultura (CAMPOS et al., 2009); a declividade definirá o potencial de mecanização que para a cana-de-açúcar está limitada a 12% (COPAM, 2009), e o clima que, dependendo da variedade escolhida pelo produtor, necessita de condições termo-climáticas adequadas devido à necessidade de alto nível de sacarose (MARIN, 2008).



Figura 4- Declividade de Minas Gerais



Fonte: EMBRAPA (1979)

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 A cana-de-açúcar**

A introdução da cultura da cana-de-açúcar no Brasil modificou toda conjuntura econômica do país, e por décadas foi o principal produto de exportação, responsável pelo crescimento econômico no período colonial. A muda trazida pelo militar português Martim Afonso de Souza em 1532 começou a ser cultivada nas áreas próximas ao engenho construído na Capitania de São Vicente, e posteriormente, em meio a uma série de fatores, (especialmente geográficos) perdeu espaço para a produção nos estados da Bahia e Pernambuco (MIRANDA, 2010; UDOP, s.d; MACHADO, 2003).

Décadas mais tarde, com a descoberta do ouro em Minas Gerais, tivemos a mudança do ciclo econômico no país e, portanto, a cana-de-açúcar aos poucos já não gerava mais a mesma riqueza, conseqüentemente, outros países como Inglaterra e França intensificaram a produção retirando o Brasil da liderança do mercado exportador (UDOP, s.d).

Em 1972, o mundo atentava-se às questões ambientais e à necessidade de estabelecer instrumentos que norteariam a um desenvolvimento sustentável e que até então não era tão debatido. Assim, realiza-se, nesse mesmo ano, a Conferência de Estocolmo, apontando princípios que serviriam de inspiração para toda a população na busca da preservação e da conservação do meio ambiente. E, em 1992, no Rio de Janeiro, realizou-se a Conferência Rio-92, objetivando aliar desenvolvimento socioeconômico com a preservação do meio ambiente (ONU, 2012).

Com a implantação dos veículos movidos a etanol, debates ambientais e a crise do petróleo, o Proálcool foi criado, em 1975, com o intuito de oferecer incentivos fiscais aos produtores de cana-de-açúcar de forma a desenvolver um sistema estrutural de cultivo bem mais moderno e sustentável do ponto de vista bioenergético, e que suprisse a falta do petróleo. Isso provocou abertura de novas fronteiras agrícolas modernas incentivadas pelo programa e mudanças no cenário agrícola do país, que passaram a refletir diretamente no Cerrado brasileiro, principal bioma modificado por essas transformações econômicas. (CASTRO, et al., 2010)

A modernização do agronegócio no Cerrado foi nítida, em poucos anos, toda a conjuntura socioeconômica fora alterada, processos de urbanização, programas de incentivo do governo, alta modernização tecnológica no campo, avanço da infraestrutura e uma logística

integradora com os demais estados possibilitou a consolidação da fronteira agrícola. Uma das principais inovações no campo agrícola foi a correção do solo, mecanização e modernos insumos agrícolas, resolvendo o problema da baixa fertilidade do solo. No que se refere à cana-de-açúcar, com o desenvolvimento de novas variedades da cultura da cana-de-açúcar, foram lançadas no mercado, na tentativa de aprimorar sua qualidade e a resistência a pragas, as chamadas cultivares híbridas.

No Brasil, desde 1913, com a fundação da Estação Experimental de Escada em Pernambuco e Campos (RJ), o país tem desenvolvido diversas pesquisas relacionadas ao melhoramento genético da cana-de-açúcar. Atualmente, conta com projetos vinculados a instituições privadas e públicas como o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), a Ridesa (Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro) junto a UFSCar (Universidade Federal de São Carlos), a UFV (Universidade Federal de Viçosa), a UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), a UFAL (Universidade Federal de Alagoas), a UFPR (Universidade Federal do Paraná), a UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso), a UFPI (Universidade Federal do Piauí), a UFG (Universidade Federal de Goiás), a UFS (Universidade Federal de Sergipe) e a UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro), tendo estas avançado nos estudos da gramínea. Dentre as variedades mais cultivadas hoje em dia na região Centro-Sul estão RB867515, RB966928, CTC4 e IAC91-1099 (SANTIAGO e ROSSETO, 2008; RIDESA, s.d; ESALQ/USP, 2016).

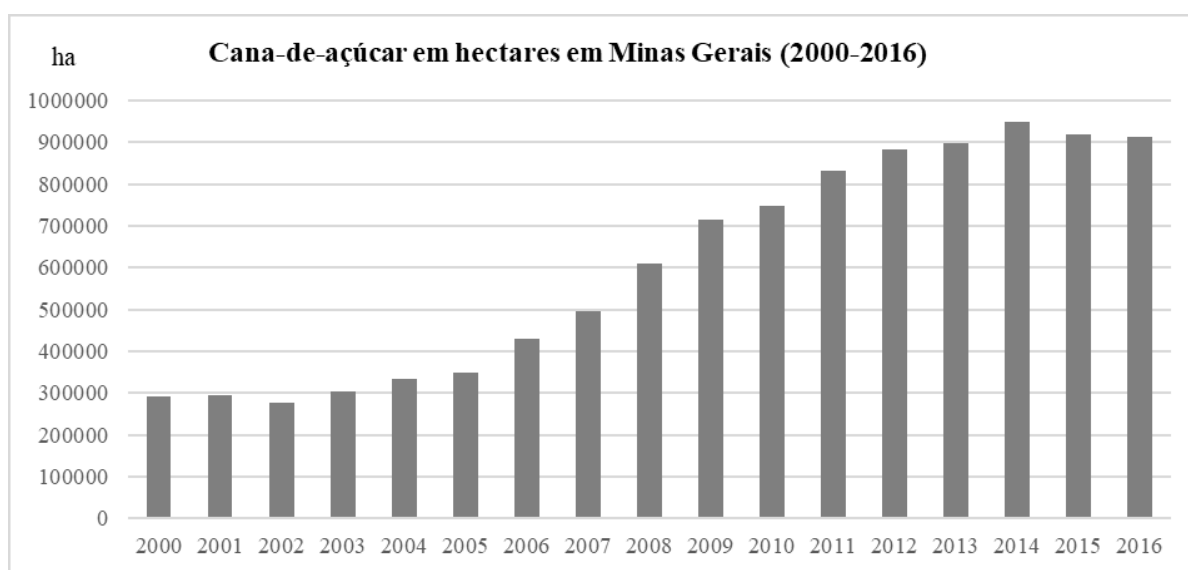
O resultado de todo conjunto de medidas subsidiárias e investimento em tecnologias é a liderança do país frente a produção internacional. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (641 milhões toneladas, safra 2017/2018), o maior exportador de açúcar do mundo (27,8 milhões de toneladas), e o segundo maior produtor global de etanol (27,9 bilhões de litros exportados, safra 2017/2018). Há 367 unidades produtoras de cana-de-açúcar em todo país, com cerca de 2,4 milhões de pessoas com vínculo empregatício em toda cadeia produtiva do setor sucroenergético, além de movimentar cerca de 2% do PIB brasileiro (UNICA, 2018).

Minas Gerais é o segundo maior estado produtor de cana-de-açúcar do país. Segundo o Seapa (2017), a produção totalizou 72,53 mil toneladas, correspondendo a 10,2% da participação relativa do estado no setor sucroenergético, perdendo apenas para São Paulo, com 382.176,0 mil toneladas e com 54% da participação na produção brasileira.

Destaca-se em Minas Gerais as três principais mesorregiões em área plantada: Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Noroeste e Sul, com 48.089.809, 4.562.968, 4.332.803 toneladas, respectivamente. Dentre os principais países no qual se destina a produção dos derivados da cana-de-açúcar, temos os EUA com 100% do etanol, e o açúcar sendo destinado a Bangladesh (16,1%), Índia (12,1%), Argélia (11,6%), Nigéria (11,1), Malásia (7,8%) e os demais (41,3%) (SEAPA, 2017).

No Gráfico 1, temos a área destinada a colheita com cana-de-açúcar em Minas Gerais nos últimos 17 anos, de acordo com o IBGE, de 2000 (pouco antes da implementação dos carros *flex fuel*) com 292.571 ha até 2016 com 911.614 ha. Observa-se o crescimento da área plantada da cultura após a inserção desses veículos no mercado. Outros possíveis fatores que elevaram o crescimento desses números foram os atrativos naturais, econômicos e fiscais no estado.

Gráfico 1 – Área plantada com cana-de-açúcar em Minas Gerais no período de 2000 a 2016

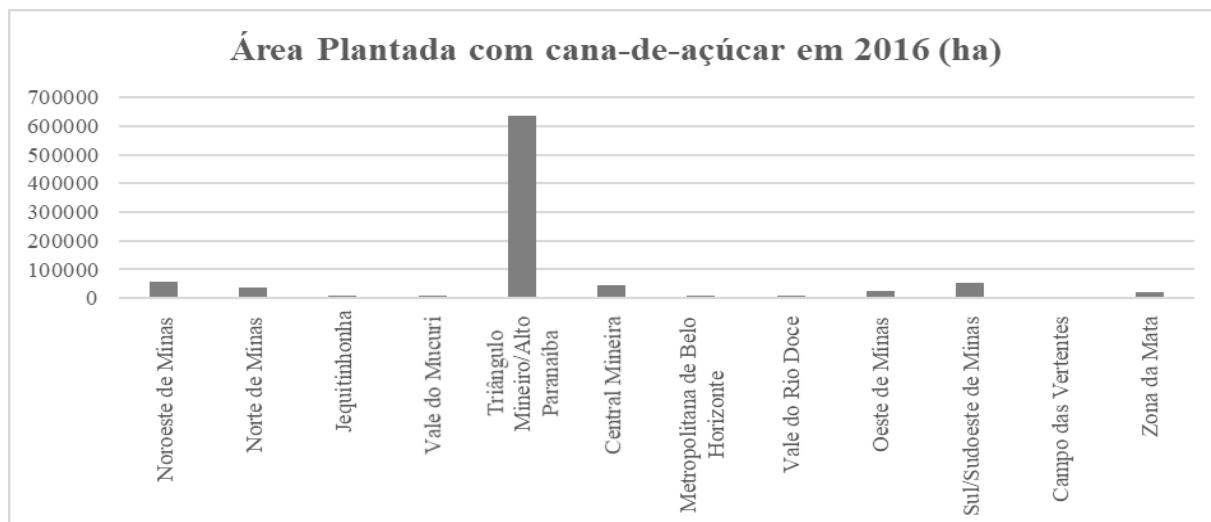


Fonte: IBGE (2017)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2017)

No estado mineiro, das 12 mesorregiões, o TMAP (Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba) concentra a maior área de cana-de-açúcar (Gráfico 2). Além dos fatores apresentados anteriormente (aptidão e inaptidão hídrica e térmica, solos, etc.), o alto nível técnico-operacional pode ter contribuído para o desenvolvimento e o melhoramento agrícola.

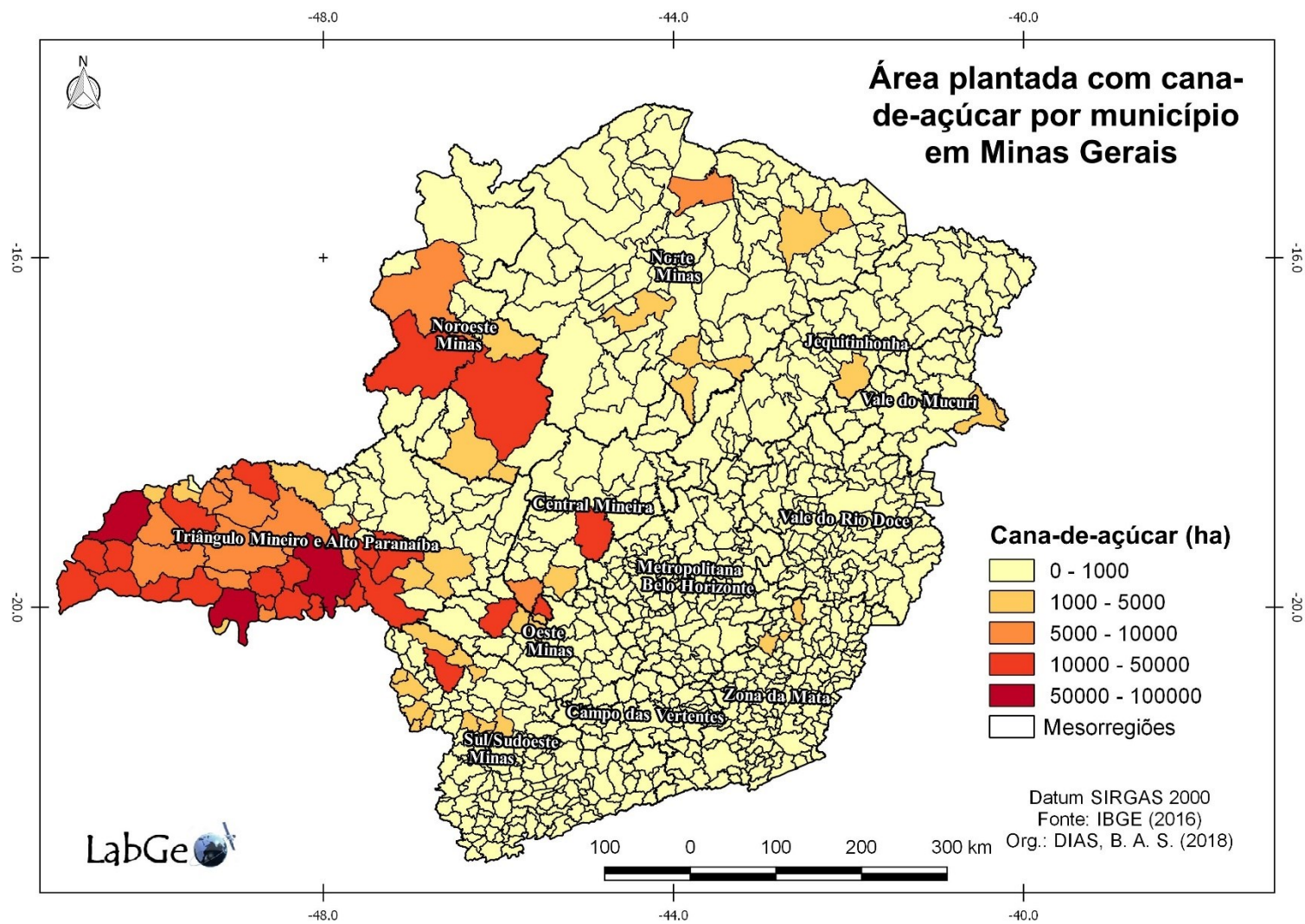
Gráfico 2 – Área plantada de cana-de-açúcar em hectares nas mesorregiões de Minas Gerais (2016)



Fonte: IBGE (2017)  
Org.: Dias, B. A. S. (2017)

Desse modo, a cana-de-açúcar na mesorregião do TMAP configura-se como uma cultura altamente presente e influente na região (Figura 5). Segundo dados do Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool no Estado de Minas Gerais (Siamig), na safra 2016/2017, a mesorregião representou 71% da área de cana-de-açúcar, 73% do açúcar e 69% do etanol, isso representa uma área de 651.033 ha (SEAPA, 2017).

Figura 5- Área plantada com cana-de-açúcar por município em Minas Gerais (2016)



Fonte: IBGE (2016)

Na Tabela 1, verifica-se que os 10 principais municípios produtores de cana-de-açúcar em Minas se concentram na mesorregião do TMAP, com exceção apenas do município de João Pinheiro pertencente à mesorregião Noroeste. Dos principais municípios produtores do TMAP, apenas Santa Vitória e Ituiutaba não fazem fronteira com o estado de São Paulo, os demais estão localizados na porção sul da mesorregião os quais estão próximos de grandes municípios paulistas produtores da cana-de-açúcar, como Barretos, Guaira, Ituverava, dentre outros. Além disso, a área plantada desses 10 municípios no ano de 2016 correspondeu a mais de 43% da total do estado.

Tabela 1- *Ranking* dos municípios produtores de cana-de-açúcar de Minas Gerais em 2016.

| <b>Ranking</b> | <b>Município</b>      | <b>Área plantada (IBGE, 2016)</b> |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------|
| <b>1</b>       | Uberaba               | 73.720                            |
| <b>2</b>       | Frutal                | 61.972                            |
| <b>3</b>       | Santa Vitória         | 54.000                            |
| <b>4</b>       | Conceição das Alagoas | 45.000                            |
| <b>5</b>       | Iturama               | 28.820                            |
| <b>6</b>       | João Pinheiro         | 28.786                            |
| <b>7</b>       | Água Comprida         | 26.000                            |
| <b>8</b>       | Campo Florido         | 26.000                            |
| <b>9</b>       | Ituiutaba             | 26.000                            |
| <b>10</b>      | Limeira do Oeste      | 24.212                            |
| <b>Total</b>   |                       | <b>394.510</b>                    |

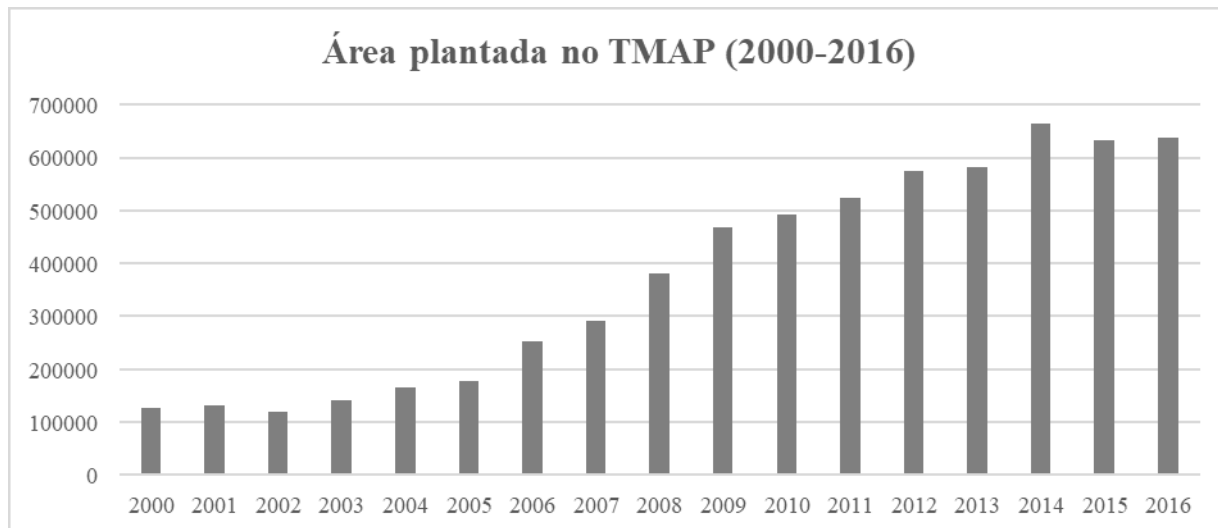
Fonte: IBGE (2016)  
Org.: Dias, B. A. S. (2017)

Os dados apresentados no Gráfico 3 demonstram o crescimento da área plantada com cana-de-açúcar na mesorregião do TMAP ao longo dos 17 últimos anos, coletados pelo IBGE (2000-2016).

Podemos notar que o crescimento da área de cana-de-açúcar no estado se relaciona com o aumento da área no TMAP. No Gráfico 3, observa-se que até o ano de 2002 a área disponível para colheita foi de 140.000 ha, sendo considerada relativamente baixa quando comparada a 2014 (ano com maior área plantada). Nos anos posteriores a 2002, ocorre um aumento de quase sete vezes em relação ao período anterior a essa data. Segundo o IBGE, o ápice da área plantada se deu no ano 2014 (664.735 ha), em 2015 verifica-se uma queda de 4,9% (632.163 ha) e em 2016 (último dado fornecido pelo IBGE) houve um discreto aumento em relação ao ano anterior (quase 1%). A Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2016, p. 8) explicou o motivo da queda na área plantada na região sudeste “a área colhida deverá aumentar em relação à safra anterior, uma vez que as chuvas atrasaram a colheita da safra anterior e que aumentou a

quantidade de cana-de-açúcar bisada para a atual safra, refletindo num aumento de 4,2% na área plantada total”.

Gráfico 3 – Área plantada com cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (1990-2016)



Fonte: IBGE (2017)  
Org.: Dias, B. A. S. (2017)

Os municípios do TMAP que estão próximos ao estado de São Paulo se assemelham muito em algumas características físicas e econômicas, especialmente nas grandes áreas de cana-de-açúcar. Dentre eles, podemos citar o município de Uberaba com a maior área disponível para colheita da mesorregião, considerada a capital da cana-de-açúcar, no qual sua área chegou a 6,9 milhões de toneladas na safra de 2014/2015. Além da cana-de-açúcar, o milho, a soja, fertilizante e melhoramento genético da raça Zebu elevam o município para o topo nesses setores (SIAMIG, 2016).

Ao compararmos o Quadro 1 e a Tabela 2, podemos notar que as usinas estão instaladas em todos os municípios que mais produzem a cana-de-açúcar. Ressaltando que, segundo a Siamig (2017), das 34 usinas presentes em todo o estado, 21 encontram-se no TMAP, cinco na região Noroeste, duas no Sul de Minas, duas no Centro-Oeste e uma na Zona da Mata, uma na mesorregião Central Norte e uma no Vale do Mucuri, fato que confirma a efetividade e potencialidades da região do TMAP quanto ao desenvolvimento econômico da produção de cana-de-açúcar (Quadro 1).



Quadro 1 – Municípios e usinas de cana-de-açúcar em Minas Gerais

| <b>Município</b>         | <b>Razão Social</b>   |
|--------------------------|---|
| 1. Araporã               | Usina Alvorada Ltda. Açúcar e Alcool                        |
| 2. Bambuí                | Total Agroindústria Canavieira S/A                          |
| 3. Campo Florido         | S. A. Usina Coruripe Açúcar e Alcool                        |
| 4. Canápolis             | Damfi Destilaria Antônio Monte Filho Ltda.                  |
| 5. Carneirinho           | S. A. Usina Coruripe Açúcar e Alcool                        |
| 6. Conceição das Alagoas | Usina Delta S/A - Unidade Volta Grande                      |
| 7. Conquista             | Usina Delta S/A – Unidade Conquista de Minas                |
| 8. Delta                 | Usina Delta S/A - Unidade Delta                             |
| 9. Frutal                | Usina Cerradão Ltda.  |
| 10. Frutal               | Usina Frutal Açúcar e Alcool S/A                            |
| 11. Itapagipe            | Usina Itapagipe Açúcar e Alcool Ltda.                       |
| 12. Ituiutaba            | BP Biocombustíveis  |
| 13. Iturama              | S. A. Usina Coruripe Açúcar e Alcool                        |
| 14. Jaíba                | Sada Bio Energia e Agricultura Ltda                         |
| 15. João Pinheiro        | Destilaria W.D.Ltda   |
| 16. João Pinheiro        | Destilaria Veredas Indústria de Açúcar e Alcool Ltda.       |
| 17. João Pinheiro        | Destilaria Rio do Cachimbo Ltda                             |
| 18. Lagoa da Prata       | Biosev S/A  |
| 19. Limeira do Oeste     | S. A. Usina Coruripe Açúcar e Alcool                        |
| 20. Limeira do Oeste     | Cabrera Central Energética Açúcar e Alcool                  |
| 21. Monte Belo           | Usina Monte Alegre Ltda                                     |
| 22. Paracatu             | Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda                |
| 23. Paracatu             | Bioenergética Vale do Paracatu S/A                          |
| 24. Passos               | Usina Açucareira Passos S/A                                 |
| 25. Pirajuba             | Usina Santo Ângelo Ltda                                     |
| 26. Pompéu               | Agropeu Agro Industrial de Pompéu S/A                       |
| 27. Santa Juliana        | Agroindustrial Santa Juliana S/A                            |
| 28. Santa Vitória        | Santa Vitória Açúcar e Alcool                               |
| 29. Serra dos Aimorés    | Dasa Destilaria de Alcool Serra dos Aimorés S/A             |
| 30. Tupaciguara          | Destilaria Cachoeira Ltda                                   |
| 31. Tupaciguara          | Bioenergética Aroeira S/A                                   |
| 32. Uberaba              | Companhia Energética de Açúcar e Alcool Vale do Tijuco Ltda |
| 33. Uberaba              | Usina Uberaba   |
| 34. Urucânia             | Companhia Agrícola Pontenovense                             |

Fonte: Siamig (2017)

Org. e Adaptação.: Dias, B. A. S. (2017)

Ressalta-se que pela grande quantidade de usinas no estado, elas possuem um alto potencial de impacto ao meio ambiente, relacionados à água, ao solo e à atmosfera, e que devem ser analisadas.

A palavra “açúcar” é derivada de “*shakkar*” (açúcar em sânscrito), antiga língua da Índia (UDOP, s.d) que significa “grãos de areia”. Considerado um dos alimentos mais consumidos do mundo, o açúcar pode ser derivado de diversas culturas agrícolas, como: beterraba, milho e cana-de-açúcar. Essa última responsável por aproximadamente 80% do mercado mundial (BORGES, 2017).

Botanicamente, a cana-de-açúcar pertencente a:

Família GRAMINEAE, da classe das Monocotiledôneas e é a única representante da Ordem Graminales, a qual se caracteriza por apresentar flores pequenas, praticamente destituídas de perianto e protegidas por bracteas e bractéolas secas, reunidas em típicas inflorescências. O fruto é seco do tipo cariopse e com semente de endosperma abundante. (ARANHA E YAHN, 1987, p.4)

Todavia, a espécie *Saccharum officinarum* L originária do sudeste da Ásia é a principal cultivada no Brasil e por características edafoclimáticas adaptou-se bem ao solo brasileiro. De acordo com Silva e Silva (2012, p. 22), essa espécie é:

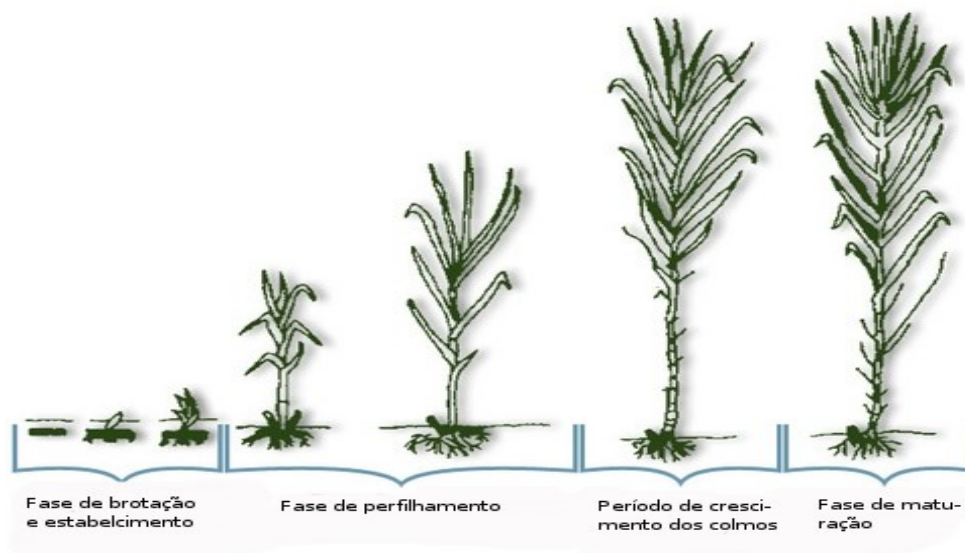
constituída pelas chamadas canas nobres. Apresenta alto teor de açúcar e baixa porcentagem de fibra. São consideradas canas tropicais, por seus colmos grossos (3,5 cm ou mais de diâmetro) e o sistema radicular reduzido e superficial. São exigentes quanto ao clima e ao solo e são suscetíveis a doenças como o mosaico e serem e resistentes a inúmeras outras.

Quanto à morfologia dessa espécie de cana-de-açúcar, é composta por raízes, colmo, folha, nó, gema, entrenó, inflorescência, flor e frutos, suas principais características são:

plantas eretas, perenes, rizomatosas. Inflorescência formada por racemos arranjados em grandes panículas. Espiguetas distribuídas aos pares sendo uma séssil e a outra pedicelada, ambas desarticulando do eixo pela base. Glumas um pouco rijas, lema estéril homogeneamente hialina e a lema fértil, também hialina ou por vezes ausente (ARANHA E YAHN, 1987, p. 7).

Segundo Thomas (2016), o ciclo da cana-de-açúcar perpassa por quatro fases de desenvolvimento: brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos. A Figura 6 ilustra os estádios fenológicos da gramínea. O período de brotação inicia-se de sete a dez dias posteriores ao plantio; a emergência de 20 a 30 dias; o perfilhamento começa um mês após a emergência e a maturação dá-se com o crescimento dos colmos remanescentes.

Figura 6 – Estádios fenológicos da cana-de-açúcar



Fonte: Gascho & Shih (1983)

Conforme a variedade da planta e vários outros fatores, temos a duração dos ciclos podendo ser: cana-de-ano-e-meio (14 a 22 meses), cana-de-ano (12 meses), e cana-de-inverno (12 a 16 meses). Esses três tipos de plantios são caracterizados como:

Plantio de outono-inverno: Consiste em um plantio realizado em áreas fertirrigadas, em períodos de muita seca (junho, julho e agosto). Para esse tipo de plantio as variedades não podem florescer, pois o período indutivo de florescimento é de fevereiro a março, e se forem plantadas variedades que floresçam isso acontecerá com a cana entre os sete e oito meses, e com seu crescimento será interrompido.

Plantio de cana-de-ano: Plantio que ocorre no período de setembro a outubro, preferencialmente implantado nos melhores solos da companhia, pois o canavial terá uma taxa de crescimento bem maior do que em outro tipo de solo.

Plantio de cana-de-ano-e-meio ou cana de 18 meses: Isto significa que a colheita do primeiro corte deste canavial será com 18 meses de idade. É um plantio realizado entre janeiro e abril. O recomendado para esse plantio é usar os solos melhores em janeiro e fevereiro e em março e abril o plantio nos solos mais fracos. (BONINI E ROSA, 2007, p. 31)

Em São Paulo, assim como em Minas Gerais, tanto a época de plantio quanto a colheita seguem esses mesmos padrões citados por Aguiar et al. (2011, p. 2684):

Sugarcane planting is mainly done at two moments: (i) at the start of the September–October rainy period, when twelve-month sugarcane is planted for harvesting between April and December of the following year; and (ii) at the end of the February–March rainy period, when eighteen-month sugarcane is planted for harvesting between April and December of the following year.

A cana-de-açúcar exige condições climáticas favoráveis em todo o período de cultivo, além da temperatura em torno de 32° C para a planta germinar, ela precisa de umidade adequada, segundo Alfonsi et al. (1987, p.42):

Devido à necessidade de alta produção da sacarose, planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequada para permitir o desenvolvimento suficiente durante a fase vegetativa, seguido de um período com restrição hídrica e/ou térmica para forçar o repouso vegetativo e o enriquecimento em sacarose na época do corte. Portanto, apesar da sua grande adaptação as condições climáticas, a planta encontra suas melhores condições quando ocorre um período quente e úmido, com alta radiação solar durante a fase de crescimento, seguido de um período seco, ensolarado e mais frio durante as fases de maturação e colheita.

Estudos realizados no estado de São Paulo (DIAS et al., 1999; VITTI, 2013) indicam que os ambientes com solos eutróficos (alta saturação de base, igual ou superior a 50%) apresentam a maior produtividade pela alta fertilidade natural e por ser rico em nutrientes como o Ca:

por apresentarem saturação por bases superior a 50% em profundidade, fazendo com que a raiz explore maior volume de solo, possibilitando maior aporte de água. Dessa forma, a absorção de nutrientes é favorecida e a planta passa a suportar veranicos com mais facilidade. Além disso, a elevada saturação por bases favorece a reação desse solo, o que melhora a disponibilidade de nutrientes e permite melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados (STAUT, 2006, s.p).

Na Tabela 2 são apresentados os ambientes e as épocas de colheita da cana-de-açúcar, percebe-se que nos ambientes eutróficos cuja produção é mais favorável à cultura da cana-de-açúcar, um colmo no terceiro corte apresenta produtividade de 109 t/ha no ciclo de outono caindo para 90,4 t/ha no ciclo da primavera, já num ambiente de alta restrição como o ácrico, há uma queda de 30% em relação ao ciclo de outono, o qual ocorre a maior produtividade (VITTI, 2013).

Tabela 2 – Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e época de colheita

| <b>Ambientes</b>                                    | <b>Época de colheita</b>             |                                     |  |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
|   | Ciclo de outono<br>(início de safra) | Ciclo de inverno<br>(meio de safra) | Ciclo de Primavera<br>(final de safra) |
| <b>Produção de colmo no terceiro corte (t/ha)**</b> |                                      |                                     |  |
| <b>Eutrófico (+2)*</b>                              | 109                                  | 93,5                                | 90,4                                   |
| <b>Mesotrófico (+1)</b>                             | 100                                  | 102                                 | 91,3                                   |
| <b>Distrófico (0)</b>                               | 84,1                                 | 82,6                                | 71,9                                   |
| <b>Ácrico (-2)</b>                                  | 85,3                                 | 67,3                                | 60,9                                   |

\*: Quanto mais positivo mais favorável o ambiente de produção

\*\* : Fonte: Centro de Cana-IAC-Projeto CAIANA com 6.948 dados observados

Fonte: VITTI (2003)

Ao relacionarmos o ambiente de produção com a produtividade da cana-de-açúcar, observa-se que a mesorregião do TMAP possui a maior área disponível para colheita do estado (637.268 ha, ou seja, 70%).

Os principais tipos de solo são de ambientes distróficos (de baixa saturação, inferiores a 50%) considerados pouco férteis e pobres em  $\text{Ca}^2$ ,  $\text{Mg}^2$  e  $\text{K}^+$  (Amaral et al., 2014), como o Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico, Gleissolo Háplico, Nitossolo vermelho e Cambissolo Háplico. Tal fato faz com que essa região necessite de uma maior quantidade de insumos e um adequado manejo para que ocorra um aumento na produtividade. No entanto, isso não se torna um empecilho, já que Uberaba, o maior município produtor do estado, teve uma produtividade média de 85 t/ha, pouca diferença quando comparado ao município de Rio Brilhante (MS), maior produtor do país, com 91,4 t/ha (2016). Quanto ao dado estadual, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais foi de 78,06% t/ha enquanto a média da região Centro-Sul foi de 77% para a safra 2016/2017 (SEAPA, 2017; UNICA, 2017).

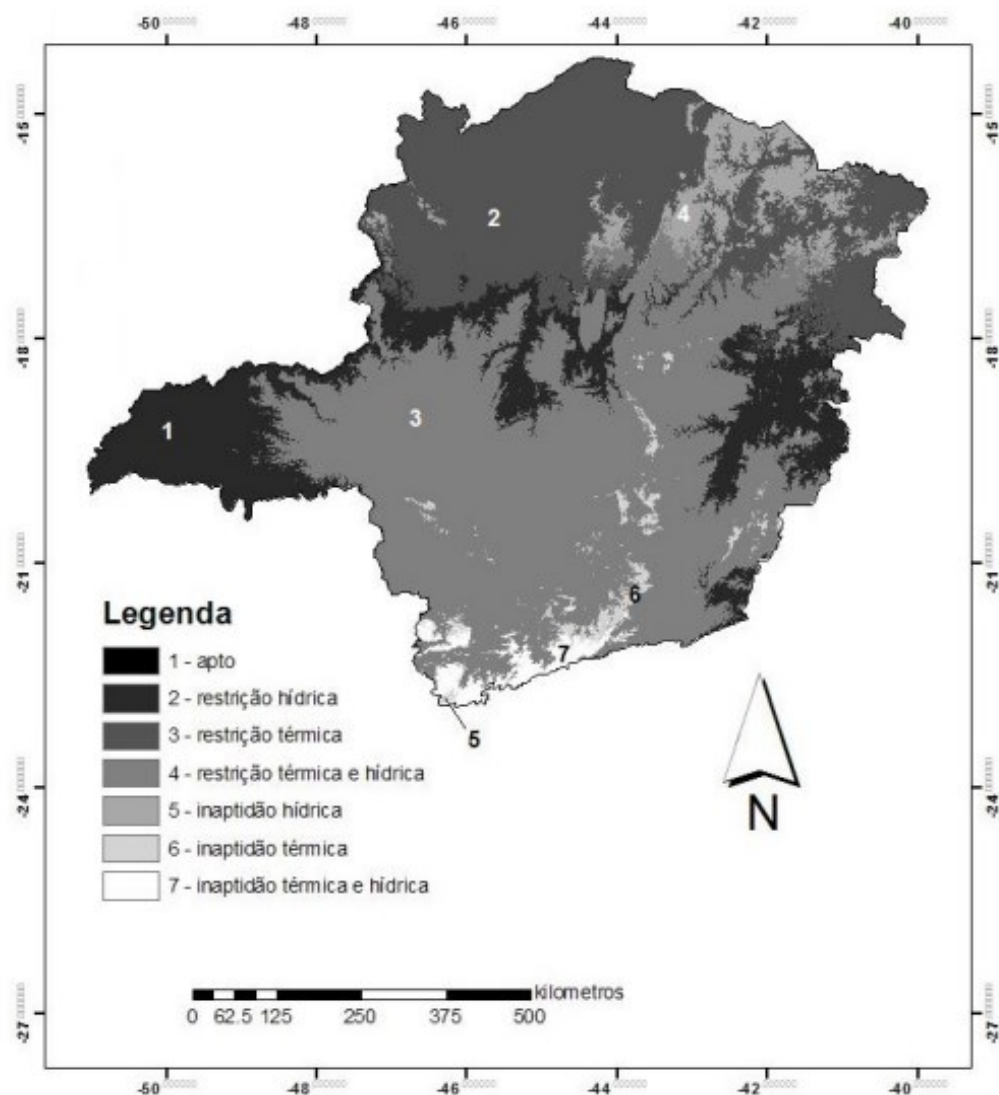
Em Minas Gerais, a maior área apta à cultura da cana-de-açúcar está presente no oeste do TMAP, isso não significa que possui os solos mais férteis, mas sim que os fatores temperatura e déficit hídrico junto às características geográficas da região a torna uma área apta ao cultivo da cana-de-açúcar, já que tais elementos são essenciais para maturação e desenvolvimento da gramínea.

As áreas de aptidão agrícola da cultura da cana-de-açúcar no estado são mostradas na Figura 7, segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (1976, p.5), a aptidão agrícola consiste:

land evaluation is concerned with the assessment of land performance when used for specified purposes. It involves the execution and interpretation of basic surveys of climate, soils, vegetation and other aspects of land in terms of the requirements of alternative forms of land use. (FAO, 1976, p. 5)

Portanto, nota-se na Figura 7 que o Pontal do TMAP possui a maior área propícia ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, outras áreas como as mesorregiões do Rio Doce, Noroeste e Central também possuem algumas áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, isso pode estar relacionado ao tipo climático característico dessas regiões, que é o Aw (clima tropical com estação seca de inverno), presente em áreas de baixa altitude.

Figura 7 – Aptidão e inaptidão hídrica e térmica para a cana-de-açúcar em Minas Gerais.



Fonte: Almeida et al. (2013)

A restrição térmica está presente em grande parte do estado, deve-se ao fato de que nessas regiões as temperaturas são relativamente baixas em relação ao restante do estado, apresentando os tipos climáticos identificados como Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) e Cbw (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado). Nessas áreas, estão presentes as serras que contribuem para baixa temperatura e a inaptidão agrícola para a cana-de-açúcar (SÁ JÚNIOR, 2009).

## **2.2 Colheita da cana-de-açúcar**

No Sudeste, a colheita da cana-de-açúcar pode ocorrer de abril a novembro, e, de acordo com a maturação da variedade plantada, seus ciclos podem variar de precoce, média ou tardia, dependendo das características geográficas da região (SANTOS e BOREM, 2013). Essa etapa consome aproximadamente 40% dos custos totais do processo de produção da cana-de-açúcar, variando de R\$ 27,00 a R\$33,00 por tonelada (CNA, 2017).

Em razão disso, antes da realização da colheita da cana-de-açúcar, é indispensável o planejamento agrícola da área destinada a colheita, em função disso, um banco de dados contendo todas as informações dos talhões é de extrema importância, pois neles constarão informações como tipo de colheita, estágio fenológico, produtividade estimada, tipo de solo e tipo de variedade, que consequentemente contribuirão nos cálculos de custos de produção.

Atualmente, as usinas sucroenergéticas terceirizam os serviços relacionados à produção da cana-de-açúcar, principalmente na etapa da colheita. Todavia, dependendo do tipo de contrato estabelecido entre usina e o dono da terra, a usina será ou não responsável pela colheita da cana-de-açúcar. De acordo com Rosa e Bononi (2007, p. 20), existem três tipos de contrato, são eles:

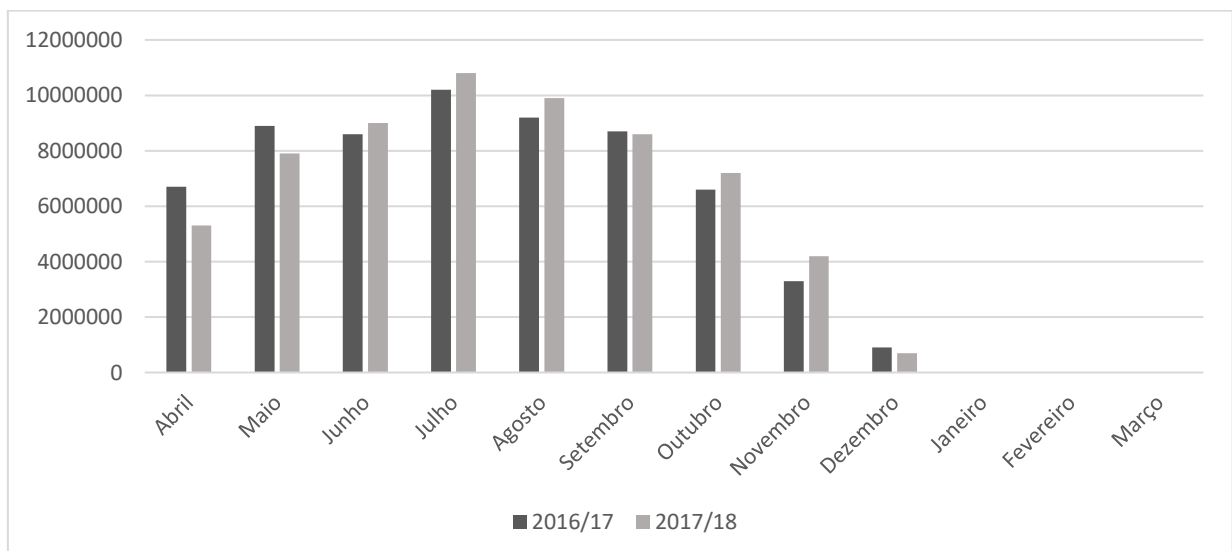
Contrato de fornecedores: contrato feito para garantia de entrega da matéria-prima na unidade industrial. Neste tipo de contrato o proprietário é responsável pelo plantio, pelos tratos culturais, pelo corte, carregamento e transporte até o ponto de descarga, que é a entrega da matéria-prima.  
Contrato de prestação de serviço: nesse tipo de contrato, o proprietário realiza o plantio e os tratos culturais do canavial e a usina realiza o corte, carregamento e transporte (CCT) da matéria-prima à unidade industrial e esses serviços são descontados do proprietário.

Contrato de parceria: todos os serviços são realizados pela companhia, desde o preparo do solo até a entrega da matéria-prima na unidade industrial. (ROSA E BONONI, 2007, p. 20)

Na colheita da matéria-prima, além dos colmos, materiais estranhos mineral e vegetal estão presentes nesse processo de cultivo. Por isso, quando empregada a prática da queima na colheita, busca-se evitar “acidentes com animais peçonhentos; facilitar e aumentar o rendimento do corte; eliminar de 50% a 70% as folhas secas; controlar pragas e plantas daninhas; reduzir custos de transporte, corte e carregamento e propiciar condições de acordo coletivo entre patrão e empregado”. Enquanto na colheita mecanizada, a inclusão da máquina garante uma “maior flexibilidade da colheita; aumento das atividades microbianas e de minhocas; melhoria da estrutura do solo; menor custo dos tratos culturais; proteção do solo contra erosão e radiação” (OLIVEIRA e BARROCAS, 2001).

De acordo com a Conab (2018), no calendário agrícola de colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais (Gráfico 4), a época da colheita ocorre de abril a novembro, enquanto os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, devido aos altos índices pluviométricos, favorecerem o desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo assim, nesses meses a colheita é dificultada.

Gráfico 4 – Colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais em toneladas (Safrá 2016/17 e 2017/2018).



Fonte: Conab (2018)  
Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

Para determinar qual o tipo de colheita, deve ser observado diversos fatores, como a declividade do terreno, proximidade com a área urbana, se a área apresenta indícios de erosão



e/ou materiais que impossibilita a passagem do maquinário, dentre outros. No caso da declividade, a legislação atribui especificações que direciona a escolha do tipo de colheita nesse caso, segundo a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), nº 133, de 15 de abril de 2009:

Art. 1º - Os produtores e empreendimentos consumidores de cana-de-açúcar implantados no Estado de Minas Gerais a partir de 2008, nas áreas com declividade inferior a 12% (doze por cento), poderão utilizar a prática de queima controlada em no máximo 20% (vinte por cento) de área a ser implantada, devendo esta prática ser eliminada na totalidade de área até o ano de 2014. (COPAM, 2009, nº 133)

Diante de vários riscos ambientais e sociais que envolvem a produção da cana-de-açúcar, o uso do fogo é um dos principais temas discutidos, empregado na cultura da cana-de-açúcar para eliminar doenças e pragas no canavial, visando facilitar a colheita manual. Sua eliminação tem se tornado inevitável, autores como Rodrigues e Abi Saab (2007) trazem em seu trabalho o custo por área e a produção com e sem queima. Segundo eles, a colheita manual com queima tem um custo área de R\$904,04 ha<sup>-1</sup>, custo produção de R\$ 8,90t<sup>-1</sup>, enquanto que na colheita mecanizada sem queima esses valores são de R\$668,36 ha<sup>-1</sup> e R\$6,58t<sup>-1</sup>, diferença de 32,74% no valor da colheita mecanizada quando comparada à manual com queima, mostrando o menor custo na colheita mecanizada. Contudo, Schogor et al. (2009) mostrou que as perdas totais da matéria verde colhida foram maiores no sistema de colheita mecanizada, 12,3%, enquanto na colheita manual a perda foi de 6,5%. Para a matéria seca, os valores foram de 18,4% de perdas totais na colheita mecanizada e 17,7% na colheita manual.

A Conab (2018) apresentou os dados relativos à colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais, percebe-se que a colheita manual vem sendo eliminada conforme determina a legislação estadual, todavia, há ainda uma porcentagem pequena de 0,5% (safra 2017/2018) que emprega o uso do fogo na pré-colheita manual (Tabela 3). Em relação à colheita mecanizada, o estado apresentou o melhor percentual de colheita mecanizada da região Sudeste de acordo com a mesma fonte.

Tabela 3 – Percentual de colheita manual e mecanizada em Minas Gerais (2007-2018)

|                   | 2007/<br>2008 | 2008/<br>2009 | 2009/<br>2010 | 2010/<br>2011 | 2011/<br>2012 | 2012/<br>2013 | 2013/<br>2014 | 2014/<br>2015 | 2015/<br>2016 | 2016/<br>2017 | 2017/<br>2018 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Manual</b>     | 80,6          | 62,5          | 62,5          | 52,5          | 38,5          | 26,8          | 19,7          | 20,0          | 15,2          | 2,03          | 0,5           |
| <b>Mecanizada</b> | 19,4          | 37,5          | 47,5          | 61,5          | 73,2          | 80,3          | 80,0          | 84,8          | 98,0          | 97,0          | 99,5          |

Fonte: CONAB (2018)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

O fato é que com a adaptação da colheita mecânica com deposição da palhada no solo ao invés da queima, resultante das pressões ambientais nacionais e internacionais, tem-se um cultivo sustentável. Além disso, certificados ambientais no setor sucroenergético foram criados de forma a avaliar as empresas em relação às questões socioambientais, cujos principais objetivos são “i) qualidade do produto; ii) certificação do processo; iii) práticas trabalhistas e sociais e iv) cumprimento de regras de mercado internacional” (OLIVEIRA et al., 2016).

Os indicadores de sustentabilidade do *Global Bioenergy Partnership* (GBEP) são baseados nos três pilares: ambiental, social e econômico, no Quadro 2 são apresentados um conjunto de 24 indicadores que visam contribuir na avaliação da sustentabilidade do setor de bioenergia em nível nacional:

Quadro 2- Pilares e indicadores de sustentabilidade

| <b>Pilares</b>   |  |   |
|--|--|---|
| <b>Ambiental</b>   | <b>Social</b>  | <b>Econômico</b>  |
| Emissão de gases de efeito estufa, Capacidade produtiva da terra e ecossistemas, qualidade do ar, Disponibilidade de água, eficiência de uso e qualidade, diversidade biológica, Mudança no uso da terra, incluindo efeitos indiretos. | Preço e oferta nacional de uma cesta de alimentos, acesso à terra, água e outros recursos naturais, Condições de trabalho, Rural e desenvolvimento social, acesso a energia, saúde e segurança humana. | Disponibilidade e uso de recursos e eficiências em bioenergia produção, conversão, distribuição e uso final, Desenvolvimento Econômico, Viabilidade econômica e competitividade da bioenergia, Acesso à tecnologia e capacidades tecnológicas, Energia segurança / Diversificação de fontes e fornecimento, Energia segurança / infraestrutura e logística para distribuição e uso. |

| Indicadores Ambientais   | Indicadores Sociais   | Indicadores Econômicos  |
|--|---|---|
| Ciclo das emissões dos gases de efeito estufa (GEE)                            | Alocação e posse da terra para novas produções de bioenergia                        | Produtividade   |
| Qualidade do solo  | Preço e fornecimento de uma cesta de alimentos                                      | Balanço líquido de energia  |
| Níveis de colheita de recursos de madeira                                      | Mudança na renda pela produção de bioenergia  | Valor bruto acrescentado  |
| Emissão de poluentes não GEE   | Empregos no setor de bioenergia   | Mudança no consumo de combustíveis fósseis e no uso tradicional de biomassa |
| Uso eficiência da água   | Mudança no tempo não remunerado gasto por mulheres e crianças na coleta de biomassa | Formação e requalificação da força de trabalho                              |
| Qualidade da água  | Bioenergia usada para expandir o acesso a serviços modernos de energia              | Diversidade energética  |
| Diversidade biológica  | Mudança na mortalidade e doenças atribuíveis a fumaça em ambiente fechado           | Infraestrutura e logística para distribuição de bioenergia                  |
| Uso da terra e mudança do uso da terra relacionado a produção de matéria-prima | Incidência de acidentes ocupacionais, doenças e fatalidades                         | Capacidade e flexibilidade de uso de bioenergia                             |

(conclusão)

Fonte: GBEP (2011)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

Uma das principais certificações do mercado sucroenergético é a Bonsucro criada em 2011 visando à produção sustentável, redução dos impactos ambientais e sociais causados pelo cultivo da cana-de-açúcar. Com apenas 42 certificados emitidos no Brasil possui rigorosos requisitos para sua obtenção, como: a) cumprir as leis, b) respeitar os direitos humanos e trabalhistas, c) gerenciar a eficiência dos insumos, da produção e do processamento para aumentar a sustentabilidade d) gerenciar ativamente a biodiversidade e serviços do ecossistema, e) melhorar continuamente as áreas-chaves do negócio, f) critérios adicionais e obrigatórios para o cumprimento das Diretivas da UE para Energias Renováveis (2009/28/EC) e sobre Qualidade dos Combustíveis (2009/30/EC), (BONSUCRO, 2015).

### 2.3 Sensoriamento remoto aplicado a cana-de-açúcar

O sensoriamento remoto possui a capacidade de oferecer grande variedade de aplicações, inclusive “*for monitoring crop growth and estimating crop yield due to its unique*

*capabilities in terms of its spectral, temporal and spatial resolutions*” (ZHOU et al., 2015, p. 2).

Para identificar os alvos da superfície terrestre é necessário conhecer, observar e interpretar como eles se comportam, para isso, alguns elementos de interpretação de imagens são fundamentais, tais como localização, tonalidade e cor, tamanho, forma, textura, padrão, sombra, altura e profundidade, volume, declividade, aspecto, sítio, situação e associação (Quadro 2). Portanto, com base na integração desses elementos e experiência, um intérprete conseguirá identificar e mapear não apenas a cana-de-açúcar, mas qualquer alvo da superfície.

Quadro 3- Elementos de interpretação de imagens de sensoriamento remoto

| Elemento                                       | Atributos   |
|--|---|
| Localização x, y                               | Coordenadas x,y de imagens: coordenadas (x) coluna e (y) linha em uma imagem não retificada<br>Coordenadas x,y de carta-imagem: os cristais de haleto de prata ou pixels em fotografia ou imagens são retificados para projeção de mapas (e.g. UTM) |
| Tom, cor                                       | Tom de cinza: claro (brilhante), intermediário (cinza), escuro (negro)<br>Cor: HIS= intensidade, matiz (H), saturação; RGB= vermelho, verde, azul; Munsell  |
| Tamanho  | Comprimento, largura, perímetro, área (m <sup>2</sup> )<br>Pequeno, médio (intermediário), grande   |
| Forma  | Características geométricas de um objeto: linear, curvilinear, circular, elíptico, radial, quadrado, retangular, triangular, hexagonal, etc.  |
| Textura  | Arranjo e disposição característicos de repetições de tom e cor<br>Liso, intermediário (médio), rugoso (grosso), mosqueado, salpicado   |
| Padrão   | Arranjo especial de objetos no terreno: sistemático, não sistemático ou randômico, linear, curvilinear, retangular, trançado, estriado, centrípeto, serrilhado, paralelo  |
| Sombra   | Uma silhueta causada por iluminação solar lateral   |
| Altura/Profundidade/Volume/Declividade/Aspecto | Elevação-z (altura), batimetria-z (profundidade), volume (m <sup>3</sup> ), declividade (°), aspecto (°)  |
| Sítio/Situação/Associação                      | Sítio: elevação, declividade, aspecto, exposição, adjacente a água, meios de transporte, serviços públicos<br>Situação: os objetos estão colocados em uma ordem ou orientação um em relação ao outro  |

|  |  |
|--|--|
|  | Associação: fenômenos relacionados estão, normalmente, presentes |
|--|--|

Fonte: Jensen (2009)

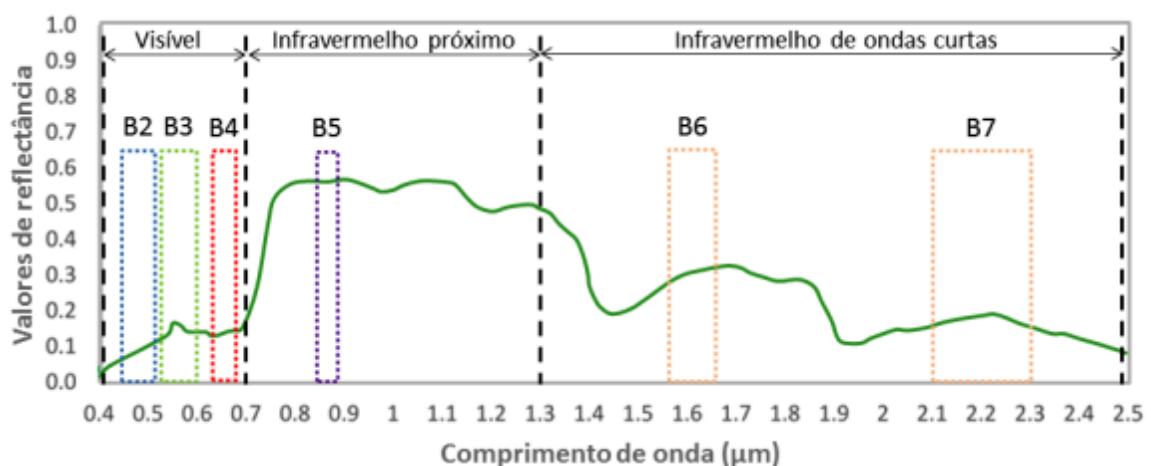
Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

Por ser uma cultura semiperene, a cana-de-açúcar possui uma dinâmica de cultivo favorável à sua identificação e mapeamento, “*the long permanence of the crop in the field increases the chance of acquiring cloud free images, which is fundamental for mapping the cultivated areas, monitoring the harvest and evaluating the land use change dynamic*”. (RUDORFF et al., 2010). Entretanto, um dos principais problemas é a confusão das informações espectrais de outras culturas, “*the extraction of sugarcane information from remote sensing data is compromised by spectral mixing with other types of crops*” (ZHOU et al., 2015, p.2), principalmente o milho.

O comportamento espectral dos objetos da superfície terrestre está diretamente relacionado aos fatores biológicos e físico-químicos de cada alvo, assim como os processos de absorção, reflectância e transmissão que ocorrem nesse processo de interação da radiação e da vegetação.

O comportamento da cana-de-açúcar em alto vigor vegetativo é semelhante à folha sadia, como mostrado na Figura 8. Observa-se na faixa do visível (0,4-0,72 $\mu$ m) que os pigmentos absorvem a radiação eletromagnética incidente devido à ação dos agentes fotossintetizantes: clorofila, xantofilas e carotenos, porém, no pico de reflectância corresponde ao comprimento de onda do verde (0,5 $\mu$ m), a clorofila reflete, por isso a coloração verde das plantas observadas pelo homem (PONZONI et al., 2012; ROSA, 2009).

Figura 8 – Comportamento espectral de uma folha em alto vigor vegetativo.



Fonte: SCHULTZ, B. (2016)

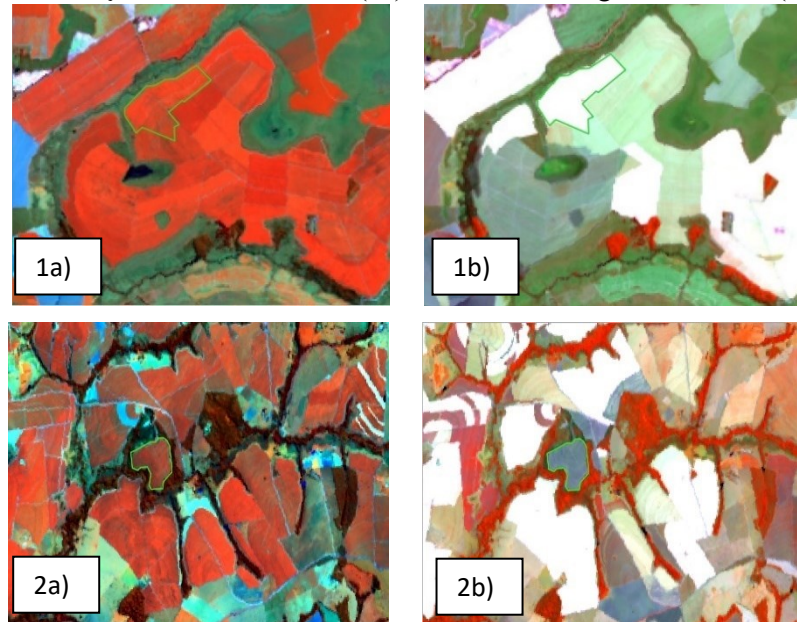
A faixa que compreende o infravermelho próximo (0,7-1,3 $\mu$ m) refere-se à estrutura celular da folha, esta apresenta alta reflectância e é quase contínua. Elementos externos também podem influenciar, ou seja, temos a interação da radiação e do mesófilo que dão equilíbrio de energia à folha, resultado do espalhamento interno, e, desse modo, ocorre o aumento da reflectância (PONZONI et al., 2012; ROSA, 2009; VALERIANO, 2003).

A região do infravermelho médio (1,3- 2,5 $\mu$ m) corresponde na folha sadia ao processo de absorção da radiação em razão da presença da água que infiltra nas lacunas das células internas da folha. De acordo com Knipling (1970), *“thus pigments and water account for the spectral regions of relatively low leaf reflectance and transmittance in an indirect manner and do not themselves have these spectral characteristics”*, ou seja, na região do visível e no infravermelho médio, quando os elementos citados estão presentes, há uma alta absorção da radiação (PONZONI et al., 2012; ROSA, 2009; VALERIANO, 2003; KNIPLING, 1970).

Quanto à identificação do sistema de colheita da cana-de-açúcar nas imagens de sensoriamento remoto, Rudorff et al. (2010) explicam que *“areas where the harvest was processed by straw burning have dark tones on the images due to the presence of ash and bare soil, while areas where the crop was harvested without straw burning appear bright due to the presence of residue composed mainly of dry leaves”*.

Na Figura 9, verifica-se um talhão colhido mecanicamente e outro com emprego do fogo. Em maio, quando a cana-de-açúcar está em alto vigor vegetativo, esta apresenta a coloração vermelha, enquanto em outubro, quando os talhões foram colhidos, estes apresentam características distintas pelo sistema de colheita escolhido. No primeiro caso, a coloração branca representa a ausência da vegetação e a alta reflectância do solo devido à presença da palhada deixada após a colheita com máquina. No segundo caso, a coloração azulada pós-colheita diz respeito aos restos de material queimado proveniente da queima anterior à colheita.

Figura 9 – Talhão de cana-de-açúcar verde em maio (1a); colhido sem fogo em outubro (1b); talhão de cana-de-açúcar verde em maio (2a); colhido com fogo em outubro (2b)



Fonte: USGS (2017)  
Org.: DIAS, B. A. S. (2018)

Em trabalhos como Sanches et al. (2005), é possível observar a semelhança espectral da palhada da cana-de-açúcar com a resposta espectral da palha do milho, em ambos, quando se compõem a palhada, apresentam a coloração que vai de esverdeada a azul, dependendo da exposição do solo, e branco, se a cobertura da palha recobre completamente o solo. Esse tende a ser o principal problema na identificação do sistema de colheita da cana-de-açúcar com ou sem queima.

Outros estudos mostram a utilização das imagens de média e baixa resolução espacial para estimar áreas e a produção de cana-de-açúcar. Em São Paulo, por exemplo, foram empregados dados de 250 m do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de alta repetitividade (diária) junto a dados NDVI e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), para mapear a cana-de-açúcar no estado, os resultados apresentados obtiveram uma média de 95,41 Exatidão Global e o Índice Kappa com média de 0,833 (ANTUNES et al., 2015).

Mello et al. (2010) e Aguiar et al. (2010) também desenvolveram trabalhos com imagens da série Landsat de média para classificação automática da colheita da cana-de-açúcar tanto para uma determinada área de predomínio da cultura no estado de São Paulo quanto para todo o estado. A técnica utilizada para identificar o sistema de colheita com e sem queima foi o MLME, que em ambos os trabalhos apresentou bons resultados na identificação da cana-de-açúcar colhida com e sem o emprego da queima.

Além disso, o projeto Canasat, já mencionado anteriormente, foi pioneiro no mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul, cujos dados obtidos apresentavam excelentes resultados, “*the overall accuracy (OA) index was 98% varying from 97% for the stratum with less sugarcane (0 to 5.5%) to 99% for the stratum with most sugarcane (53 to 100%)*” (ADAMI et al., 2012).

O satélite Landsat 8 foi lançado em fevereiro de 2013, atingiu sua órbita final em abril com 705 km acima da Terra, todavia, apenas em março começou a transmitir as imagens. Dentre suas principais características estão órbita circular e heliossícrona, resolução espacial 30 metros (OLI) e 100 metros (TIRS), resolução radiométrica de 16 bits, horário de passagem no Equador aproximadamente às 10 horas.

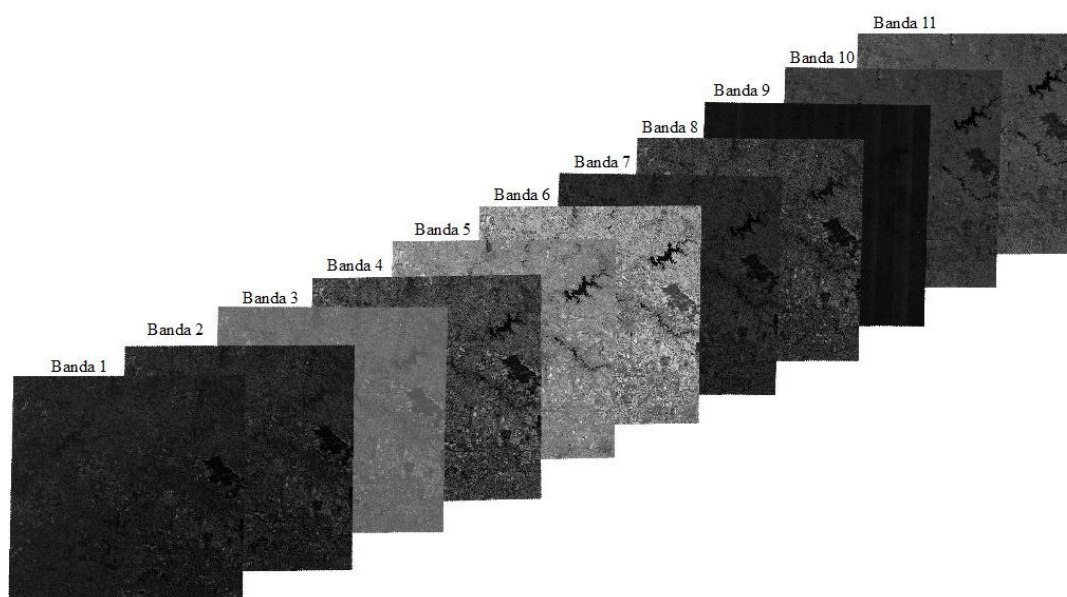
As informações obtidas pelo satélite Landsat 8 são adquiridas por meio de dois sensores acoplados ao satélite: o OLI e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), ambos com alta resolução multiespectral (16 bits). O primeiro possui nove bandas, duas a mais em relação ao ETM+/Landsat 7, são elas: banda 1 (faixa do azul), criada para recursos hídricos e zona costeira, e banda 9 (infravermelho), destinada a detecção de nuvens cirros. Todas as bandas, com exceção da banda 8 (15 metros), possuem uma resolução espacial de 30 metros (Figura 10). O segundo sensor capta duas bandas espectrais no infravermelho térmico, sua resolução espacial quando imageada é de 100 metros, reamostradas para 30 metros quando coletadas no sítio digital<sup>3</sup>. O satélite possui um ciclo de repetitividade de 16 dias, e, baseado no *Worldwide Rederence System* (WRS), permite ao usuário identificar as imagens do satélite em qualquer ponto do globo através de uma órbita/ponto.

---

<sup>3</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



Figura 10 – Bandas do sensor OLI/TIRS do satélite Landsat8



Fonte: USGS (2017)  
Org.: Dias, B. A. S. (2018)

As bandas que compõem o satélite Landsat 8 dos sensores OLI e TIRS, junto ao comprimento de onda e a resolução espacial que as constitui, são apresentados no Quadro 4. Essas imagens podem ser adquiridas em superfície de reflectância (nível 2) ou não (nível 1). O nível 2 fornece estimativas da reflectância da superfície medida ao nível do solo na ausência de dispersão ou absorção atmosférica e no nível 1 estão as imagens com a precisão do terreno já corrigidas, essas imagens são de fácil e rápida aquisição, enquanto no nível 2 o período de processamento é maior. Ambos os produtos vêm com a banda *Quality Assurance* (QA) contendo informações sobre as condições que podem afetar a precisão ou a usabilidade de um determinado pixel (USGS, 2015).

Quadro 4 – Características das bandas do satélite Landsat 8

| Bandas                                     | Comprimento de onda (micrômetros) | Resolução (metros) |
|--|-----------------------------------|--------------------|
| Banda 1 - Ultra Azul (costeira / aerossol) | 0,435 - 0,451                     | 30                 |
| Banda 2 - Azul                             | 0,452 - 0,512                     | 30                 |
| Banda 3 - Verde                            | 0,533 - 0,590                     | 30                 |
| Banda 4 - Vermelho                         | 0,636 - 0,673                     | 30                 |
| Banda 5 - Infravermelho Próximo (NIR)      | 0,851 - 0,879                     | 30                 |

|  |               |            |
|--|---------------|------------|
| Banda 6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1 | 1,566 - 1,651 | 30         |
| Banda 7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2 | 2,107 - 2,294 | 30         |
| Banda 8 - Pancromática                           | 0,503 - 0,676 | 15         |
| Banda 9 - Cirrus                                 | 1,363 - 1,384 | 30         |
| Banda 10 - Infravermelho Térmico (TIRS) 1        | 10,60 - 11,19 | 100 * (30) |
| Banda 11 - Infravermelho Térmico (TIRS) 2        | 11,50 - 12,51 | 100 * (30) |

\*Bandas reamostradas para 30 metros quando solicitada aquisição.

Fonte: USGS (2015)

Dentre as suas principais aplicações, estão os mapeamentos de recursos naturais, agricultura, enchentes, uso e cobertura da terra, urbanos, geológicos, geomorfológicos, atualização de mapas, mudanças climáticas, mapas de aptidão agrícola, estudo da vegetação, estudos socioeconômicos, etc. Diversos trabalhos no Brasil e no mundo utilizaram o sensor OLI/Landsat-8 em seus estudos como os autores Jiang et al. (2018), eles utilizaram o satélite para mapeamento de águas superficiais em oito regiões da China; Cristóbal et al. (2018) em estudos da temperatura da superfície terrestre; Van der Werff e Van der Meer (2016) em estudos geológicos; Mulianga et al. (2015) no mapeamento da cana-de-açúcar no Quênia; Solthe et al. (2017) no mapeamento dos estágios de floresta no sul do Brasil; Rocha Neto et al. (2017) na detecção da salinização do solo pela irrigação no semiárido brasileiro e Schutlz et al. (2015) no mapeamento de culturas no sudeste brasileiro.

O MODIS é um dos cinco sensores a bordo do satélite TERRA (conhecido como EOS AM-1) – os demais sensores são ASTER, MISR, CERES e MOPPIT – e um dos seis sensores acoplados no satélite AQUA (conhecido como EOS PM-1) – os outros são AMSR-E, AMSU-A, AIRS, HSB e CERES. Tanto TERRA quanto AQUA fazem parte do programa *Earth Observing System* (EOS) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o primeiro satélite lançado em 1999 e o segundo lançado em 2002.

O sensor MODIS a bordo da plataforma TERRA foi idealizado para monitorar as dinâmicas e os processos globais do continente (bandas 1 a 7), oceano (bandas 8-16) e atmosfera (bandas 17 a 19), as demais bandas, com exceção da 26, recobrem a faixa espectral do termal (Quadro 5). Esse sensor também possui um período de revisita de 1 a 2 dias, obtendo informações em 36 bandas espectrais com resolução radiométrica de 12 bits (LATORRE et al., 2003).

Alguns exemplos da utilização do sensor MODIS são Masson et al. (2018) para o mapeamento da cobertura de neve em três áreas distintas: Alpes franceses, Pirineus e Altas marroquino; Guindos-Rojas et al. (2018) para detectar áreas de queimadas na ecorregião das Ilhas Canárias; Yang et al. (2016) na avaliação diária da temperatura da superfície; Parente e Ferreira (2018) na avaliação da dinâmica espacial e de ocupação das pastagens brasileiras; e Antunes et al. (2015) e Aguiar (2007) no monitoramento da cana-de-açúcar.

Quadro 5 – Características e aplicações do sensor MODIS

| Sensor                                   | Bandas Espectrais | Largura da banda (nm) | Resolução Espacial (m) | Resolução Temporal (dias) | Área Imageada  | Resolução Radiométrica (bits) |
|--|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------|
| Limites de Terra/Nuvem/Aerossóis         | 1                 | 620 - 670             | 250                    | 1 a 2                     | 2330 x 5000 km | 12                            |
|  | 2                 | 841 - 876             |                        |                           |                |                               |
| Propriedades das nuvens/Aerossóis/Terra  | 3                 | 459 - 479             | 500                    | 1 a 2                     | 2330 x 5000 km | 12                            |
|  | 4                 | 545 - 565             |                        |                           |                |                               |
|  | 5                 | 1230 - 1250           |                        |                           |                |                               |
|  | 6                 | 1628 - 1652           |                        |                           |                |                               |
|  | 7                 | 2105 - 2155           |                        |                           |                |                               |
| Fitoplâncton/Biogeoquímica/Cor do oceano | 8                 | 405 - 420             | 1000                   | 1 a 2                     | 2330 x 5000 km | 12                            |
|  | 9                 | 438 - 448             |                        |                           |                |                               |
|  | 10                | 483 - 493             |                        |                           |                |                               |
|  | 11                | 526 - 536             |                        |                           |                |                               |
|  | 12                | 546 - 556             |                        |                           |                |                               |
|  | 13                | 662 - 672             |                        |                           |                |                               |
|  | 14                | 673 - 683             |                        |                           |                |                               |
|  | 15                | 743 - 753             |                        |                           |                |                               |
|  | 16                | 862 - 877             |                        |                           |                |                               |
| Vapor de água atmosférico                | 17                | 890 - 920             |                        |                           |                |                               |
|  | 18                | 931 - 941             |                        |                           |                |                               |
|  | 19                | 915 - 965             |                        |                           |                |                               |
| Temperatura da superfície/Nuvem          | 20                | 3660 - 3840           |                        |                           |                |                               |
|  | 21                | 3929 - 3989           |                        |                           |                |                               |
|  | 22                | 3929 - 3989           |                        |                           |                |                               |
|  | 23                | 4020 - 4080           |                        |                           |                |                               |
|  | 24                | 4433 - 4498           |                        |                           |                |                               |

|                                  |    |               |  |  |  |  |
|----------------------------------|----|---------------|--|--|--|--|
| Temperatura Atmosférica          | 25 | 4482 - 4549   |  |  |  |  |
| Vapor de água nuvem Cirros       | 26 | 1360 - 1390   |  |  |  |  |
|                                  | 27 | 6535 - 6895   |  |  |  |  |
|                                  | 28 | 7175 - 7475   |  |  |  |  |
| Propriedade das nuvens           | 29 | 8400 - 8700   |  |  |  |  |
| Ozônio                           | 30 | 9580 - 9880   |  |  |  |  |
| Temperatura de superfície/ Nuvem | 31 | 10780 - 11280 |  |  |  |  |
|                                  | 32 | 11770 - 12270 |  |  |  |  |
| Altitude máxima da nuvem         | 33 | 13185 - 13485 |  |  |  |  |
|                                  | 34 | 13485 -13785  |  |  |  |  |
|                                  | 35 | 13785 -14085  |  |  |  |  |
|                                  | 36 | 14085 -14385  |  |  |  |  |

(conclusão)

Fonte: EMBRAPA/NASA

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

O satélite PROBA-V (*Project for On-Board Autonomy-Vegetation*) foi lançado em maio de 2013 pela ESA (*European Space Agency*) e pelo CNES (*Centre National D'études Spatiales*) com o objetivo de garantir a continuidade da missão SPOT-VGT e suprir o vazio das medições da vegetação desse mesmo satélite numa versão mais compacta e aperfeiçoada. O PROBA-V foi desenvolvido para operar por um período de dois anos e meio, porém, devido ao grande desempenho, outra extensão será lançada em outubro de 2019.

O sensor *Vegetation* a bordo do PROBA\_V opera em quatro bandas espectrais (Quadro 6) com resolução espacial de 100 e 180 metros no nadir e 350 e 660 nos extremos dos canais NIR e SWIR, os produtos finais são disponibilizados em três resoluções: 100 metros, 300 metros e 1 km. O PROBA-V tem cobertura global de 90% diariamente, e, a cada dois dias, garante a cobertura global de 100% da superfície.

Quadro 6 – Características espectrais do satélite PROBA-V

| Banda       | Comprimento de onda (µm) | Faixa espectral (µm) | Horário de passagem |
|-------------|--------------------------|----------------------|---------------------|
| <i>Blue</i> | 0.464                    | 0.440 – 0.487        | 10:45               |
| <i>Red</i>  | 0.655                    | 0.614 – 0.696        |                     |
| NIR         | 0.837                    | 0.772 – 0.902        |                     |
| SWIR        | 1.603                    | 1.570 – 1.635        |                     |

Fonte: PROBA-V *Products User Manual* (2018)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

As imagens podem ser adquiridas em 3 níveis: Nível 1C, Nível 2A e Nível 3 (Quadro 7). O primeiro contém dados brutos, não projetados e dados de calibração, enquanto o segundo contém dados projetados e o terceiro contém, além de dados em reflectância da atmosfera, dados em reflectância do topo do dossel.

Quadro 7 – Nível de processamento e descrição dos produtos o satélite PROBA-V

| Nível de processamento | Descrição do conteúdo dos produtos  | Produtos entregues |
|------------------------|---|--------------------|
| Cru                    | Quadros de comunicação, conforme entregues pela <i>Data Reception Station</i> (DRS)   |                    |
| Nível 0                | - Pacotes de instrumentos, ordenados por tempo, pacotes duplicados removidos, pacotes errados retirados etc.<br>- Pacotes de manutenção, isto é, temperaturas, pressões, órbitas, atitude, correlação de tempo; ordenados por hora, pacotes duplicados removidos, pacotes errados retirados etc.  |                    |
| Nível 1A               | Dados do instrumento anotados com manutenção do instrumento e da plataforma, bem como informações auxiliares (posição, velocidade, apontamento). Todos os metadados necessários para o seguinte passo de processamento para o Nível 1B incluído. Os dados do instrumento não são processados, em resolução total, referenciados no tempo. |                    |
| Nível 1B               | L1A mais informações derivadas de geometria associada no nível do pixel   |                    |
| Nível 1C               | L1B que é corrigido radiometricamente no nível de pixel: refletância de <i>Top Of Atmosphere</i> (TOA) não projetada  | <b>L1c</b>         |
| Nível 2A               | L1C mapeado e projetado em uma grade de espaço uniforme, corrigido para nuvem, gelo / neve e artefatos de exibição (refletância de TOA projetada)   | <b>L2a</b>         |
| Nível 2B               | Dados L2A corrigidos atmosférico. Refletância <i>Top Of Canopy</i> (TOC), projetada e mapeada em uma escala uniforme de grade espacial.   |                    |

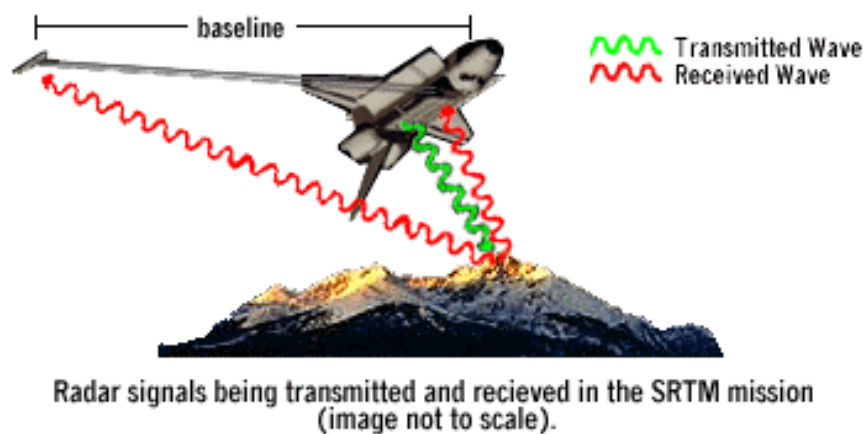
|                |  |                    |
|----------------|--|--------------------|
| <b>Nível 3</b> | Reflexões de TOA e TOC compostas sobre um período de tempo definido: 1 dia, 10 dias, 5 dias (somente para 100m). | <b>S1, S10, S5</b> |
|----------------|--|--------------------|

Fonte: ESA/SPPA (2017)

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é um projeto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) que visa produzir dados topográficos da superfície terrestre por meio da interferometria de linha fixa, isto é, “*this means two radar data sets were collected at the same time and the antennas that collected the data were separated by a fixed distance*” (USGS, 2015). Na Figura 11 podemos observar como é feita a captação das informações da superfície.

Nesse tipo de produto, uma luz é emitida pelo ônibus espacial e as ondas eletromagnéticas micro-ondas (1 m ou 0,3 GHz de frequência até 1,0 mm ou 300 GHz de frequência) transmitidas pelo radar atingem a superfície da terra e são espalhadas em várias direções, e, então, quando dispersas são captadas pelas duas antenas SRTM. Logo, mediante as informações obtidas pelas duas antenas e as diferenças de sinais de onda de radar refletidas tem-se a elevação da superfície da Terra. (USGS, 2015)

Figura 11 – Sinais de radar transmitido e recebido na missão SRTM



Fonte: USGS (2015)

Os dados das imagens SRTM possuem resolução de 1" (arcos de segundo), correspondente à resolução espacial de 30 metros, abaixo, no Quadro 8, essa e outras especificações dos dados produzidos pelo SRTM.

Quadro 8 – Características dos dados SRTM

| <i>Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)</i> |   |
|--|---|
| Projeção                                       | Geográfico  |
| Datum Horizontal                               | WGS84   |
| Datum Vertical                                 | EGM96 ( <i>Earth Gravitational Model 1996</i> )   |
| Unidades verticais                             | Metros  |
| Resolução espacial                             | 1 segundo de arco para cobertura global (~ 30 metros)<br>3 segundos de arco para cobertura global (~ 90 metros) |
| Tamanho Raster                                 | Telhas de 1 grau  |
| Comprimento de onda da banda C                 | 5,6 cm  |

Fonte: USGS (2015)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

Dentre suas aplicações, os dados do SRTM são empregados nos mais diferentes usos, como mapeamentos geomorfológicos, conservação do solo, modelagem de drenagem de água, segurança na navegação, monitoramento de vulcões e terremotos, movimentos de massa, enchentes, etc. Dentre os trabalhos utilizando o SRTM podemos citar Carvalho et al. (2014) nos estudos de detecção de depressões cársticas; Datta e Schack-Kirchner (2010) nos estudos de erosão do solo e Aguiar et al. (2010) no estudo do sistema de colheita da cana-de-açúcar.

### 3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Dados cartográficos

Para realização dos procedimentos metodológicos referentes ao objetivo geral e aos específicos foram necessários os seguintes materiais:

- 1) Imagens do sensor OLI/Landsat 8 adquiridas no período de abril de 2017 a outubro de 2017, sendo necessárias 35 imagens para recobrir todo estado por mês de acordo com o arquivo vetorial da órbita/ponto obtida no sítio digital do INPE<sup>4</sup>. Contudo, apenas o mosaico de setembro havia baixa cobertura de nuvens, sendo esse o mês escolhido para o mapeamento (Quadro 9). As demais foram utilizadas apenas como auxiliares na identificação e validação do sistema de colheita das áreas da cana-de-açúcar.

Quadro 9- Imagens do sensor OLI utilizadas referente ao ano de 2017.

| Sensor/ Satélite | Órbita/Ponto   | Bandas                  | Mês   | Dia Juliano |
|------------------|--|-------------------------|-------|-------------|
| OLI/Landsat-8    | 216/71<br>216/72<br>216/73<br>216/74<br>216/75<br>217/71 | Banda 4 (0,636 - 0,673) | Abril | 95          |
|                  |  |                         |       | 100         |
|                  |  |                         |       | 102         |
|                  |  |                         |       | 106         |
|                  |  |                         |       | 109         |
|                  |  |                         |       | 113         |
|                  | 217/72<br>217/73<br>217/74<br>217/75<br>218/70<br>218/71 | Banda 5 (0,851 - 0,879) | Maio  | 120         |
|                  |  |                         |       | 127         |
|                  |  |                         |       | 132         |
|                  |  |                         |       | 134         |
|                  |  |                         |       | 150         |
|                  |  |                         |       | 152         |
|                  | 218/72<br>218/73   | Banda 6 (1,566 - 1,651) | Junho | 157         |
|                  |  |                         |       | 159         |
|                  |  |                         |       | 161         |
|                  |  |                         |       | 166         |
|                  |  |                         |       | 170         |
|                  |  |                         |       | 173         |
|                  |  |                         |       | 175         |
|                  |  |                         |       | 180         |

continua...

<sup>4</sup> <http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/portugues/grades.php>



continuação...

| Sensor/ Satélite | Órbita/Ponto | Bandas                    | Mês      | Dia Juliano                |
|------------------|--------------|---------------------------|----------|----------------------------|
| OLI/Landsat-8    | 218/74       | Banda 4 (0,636 - 0,673µm) | Julho    | 182                        |
|                  | 218/75       |                           |          | 189                        |
|                  | 218/76       |                           |          | 191                        |
|                  | 219/70       |                           |          | 198                        |
|                  | 219/71       |                           |          | 200                        |
|                  | 219/72       |                           |          | 202                        |
|                  | 219/73       |                           |          | 205                        |
|                  | 219/74       |                           |          | 207                        |
|                  | 219/75       |                           |          | 212                        |
|                  | 219/76       |                           |          | Banda 5 (0,851 - 0,879 µm) |
|                  | 220/70       | 216                       |          |                            |
|                  | 220/71       | 221                       |          |                            |
|                  | 220/72       | 223                       |          |                            |
|                  | 220/73       | 241                       |          |                            |
|                  | 220/74       | Banda 6 (1,566 - 1,651)   | Setembro | 244                        |
|                  | 220/75       |                           |          | 246                        |
|                  | 221/71       |                           |          | 248                        |
|                  | 221/73       |                           |          | 250                        |
|                  | 221/74       |                           |          | 253                        |
|                  | 222/73       |                           | Outubro  | 255                        |
|                  | 222/74       |                           |          | 278                        |
|                  |              |                           |          | 280                        |
|                  |              |                           |          | 285                        |
|                  |              |                           |          | 287                        |
|                  |              | 292                       |          |                            |
|                  |              | 294                       |          |                            |
|                  |              | 296                       |          |                            |

(conclusão)

Fonte: USGS (2017)

Org.: Dias, B. A. S. (2018)

2) Foram utilizados dados PROBA-V para melhorar a resolução temporal dos dados de sensoriamento remoto. Os dados foram baixados do site (<http://www.vito-eodata.be/PDF/portal/Application.html>). Esses dados são oferecidos em sete diferentes produtos, são eles:

- *Level 2A – Radiometrically corrected segments, projected in plate carrée, Top-Of-Atmosphere*
- *S1-TOA – Global daily composites, Top-Of-Atmosphere*
- *S1-TOC – Global daily composites, Top-Of-Canopy*
- *S1-TOC-NDVI – Global daily composites, Top-Of-Canopy, Normalized Difference Vegetation Index band*
- *S5-TOA – 5-daily global composites, Top-Of-Atmosphere*

- *S5-TOC – 5-daily global composites, Top-Of-Canopy*
- *S5-TOC-NDVI - Global 5-daily composites, Top-Of-Canopy, Normalized Difference Vegetation Index band*

Para o presente trabalho, o produto S5-TOC-NDVI foi utilizado. Esse produto é composto a cada cinco dias com pixels livres de nuvens e resolução espacial de 100 m. Foi montada uma série temporal de imagens, datadas de 01 de janeiro de 2017 a 31 de dezembro de 2017.

- 3) Imagens fração/componentes cana-de-açúcar queimada, cana-de-açúcar crua e cana-de-açúcar verde geradas pelo método MLME (SHIMABUKURO, 2017).
- 4) Imagens SRTM, total de 74 para recobrir todo estado e identificadas de acordo com a latitude e a longitude do sistema geodésico de referência WGS84 (Quadro 10).

Quadro 10- Imagens SRTM utilizadas para recobrir todo estado de Minas Gerais.

| Modelo Digital do Terreno | Latitude | Longitude                        |                        |                        |
|---------------------------|----------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| SRTM                      | 15       | 43<br>44                         | 45<br>46               | 47                     |
|                           | 16       | 41<br>42<br>43                   | 44<br>45<br>46         | 47<br>48               |
|                           | 17       | 40<br>41<br>42                   | 43<br>44<br>45         | 46<br>47<br>48         |
|                           | 18       | 41<br>42<br>43                   | 44<br>45<br>46         | 47<br>48               |
|                           | 19       | 41<br>50<br>42<br>51<br>43       | 44<br><br>45<br><br>46 | 47<br><br>48<br><br>49 |
|                           | 20       | 41<br>50<br>42<br>51<br>43<br>52 | 44<br><br>45<br><br>46 | 47<br><br>48<br><br>49 |
|                           | 21       | 42<br>51<br>43<br>52<br>44       | 45<br><br>46<br><br>47 | 48<br><br>49<br><br>50 |
|                           | 22       | 43<br>44<br>45                   | 46<br>47<br>48         |                        |
|                           | 23       | 44<br>45                         | 46<br>47               |                        |

Fonte: USGS (2018)

Org.: Dias, B. A. S. (2018)

- 5) Dados do SatVeg encontrados no sítio digital (<https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/pages/home.html>), são informações utilizadas para observar o perfil temporal de índices vegetativos obtidos pelas imagens do sensor MODIS, possibilitando o monitoramento agrícola e ambiental, pois é gerado uma série histórica dos dados NDVI e EVI (EMBRAPA, 2014).
- 6) Dado IBGE (2000) referente ao uso e ocupação da terra do estado de Minas Gerais, para verificar a conversão do uso da terra em áreas de cana-de-açúcar. Foi utilizado mapeamento do IBGE disponibilizado no site ([https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento\\_cobertura\\_uso\\_terra/v1/](https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/)), referente ao ano de 2000, dado este proveniente da interpretação de imagens de sensoriamento remoto.
- 7) Arquivos vetoriais de Minas Gerais, das mesorregiões e municípios do estado disponibilizados pelo IBGE ([https://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm](https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm)) utilizados em todos os procedimentos de recorte da área estudada.

### 3.1.2 Equipamentos

- 1) Computador Intel Core i7-3770 3.4 GHz com 8GB de memória RAM 500GB;
- 2) Notebook Intel Core i7-6500 2.5 GHz com 8 GB de memória RAM 1TB;
- 3) Notebook Intel Core i5- 5200 2.2 GHz com 8 GB de memória RAM 1TB;
- 4) HD externo 1TB.

### 3.1.3 Softwares

- 1) QGIS 2.18 é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) criado em 2002 pelo projeto da *Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)*, *software* livre, ou seja, “baseia-se em liberdade de modificar, de reproduzir e de utilizar livremente, desde que não se restrinja o uso e a capacidade de outrem”, liberado sob a licença da GNU *General Public License* (GPL), e de código aberto, isto é, “trata de permitir a distribuição livre do programa e seu código-fonte, preservando a autoria dos mesmos” (FREITAS, 2006, p.41). Opera em ambiente Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android, suporta vários formatos vetoriais, raster, banco de dados e outras funcionalidades, pode ser obtido pelo site (<https://qgis.org/en/site/forusers/download.html>). O *software* fornece um número crescente de capacidades por meio de suas principais funções e complementos, o PostGis

é a principal extensão espacial do software para armazenamento em banco de dados. (QGIS USER GUIDE, 2018).

- 2) InterIMAGE é um sistema multiplataforma livre que fornece meios para construção de aplicações de interpretação automática de imagens por intermédio de modelos de conhecimentos definidos pelo usuário. O Projeto InterIMAGE é um projeto Internacional de Cooperação Científica coordenado pela PUC-Rio e pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) e Sensoriamento Remoto (SERE) do INPE. Sua aquisição pode ser realizada pelo site (<http://www.lvc.ele.puc-rio.br/projects/interimage/download/>). Utiliza a biblioteca TerraLib, em que são fornecidos um conjunto de operadores e classes, além disso, conta com a ajuda de programas externos, chamados operadores *top-down* (responsáveis pela partição da cena em regiões) e *bottom-up* (refinam as classes produzidas na etapa *top-down*) (MANUAL DO USUÁRIO, 2006).
- 3) Spring 5.5.3 é um SIG desenvolvido pelo INPE com participação de outras instituições nacionais (Embrapa, IBM Brasil, TECGRAF e Petrobras/CENPES). O programa desempenha diversas funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a banco de dados espaciais (CÂMARA, 1996), e pode ser obtido gratuitamente pelo site (<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php>) por meio do cadastramento do usuário.
- 4) *Google Earth Engine* é uma plataforma de computação que possibilita a análise de dados geoespaciais na própria estrutura do Google. Por meio do Editor de Códigos, é possível escrever e executar scripts em linguagem *Python* e JavaScript, no entanto, para ativar o acesso à plataforma, deve ser realizado o cadastro no site (<https://earthengine.google.com/>).

### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O pré-processamento dos dados consistiu na obtenção do mosaico das cenas do sensor OLI com resolução espacial de 30 metros e com a menor cobertura de nuvens possíveis dentro do período analisado. Para isso, três passos foram executados: composição colorida, mosaico e recorte.

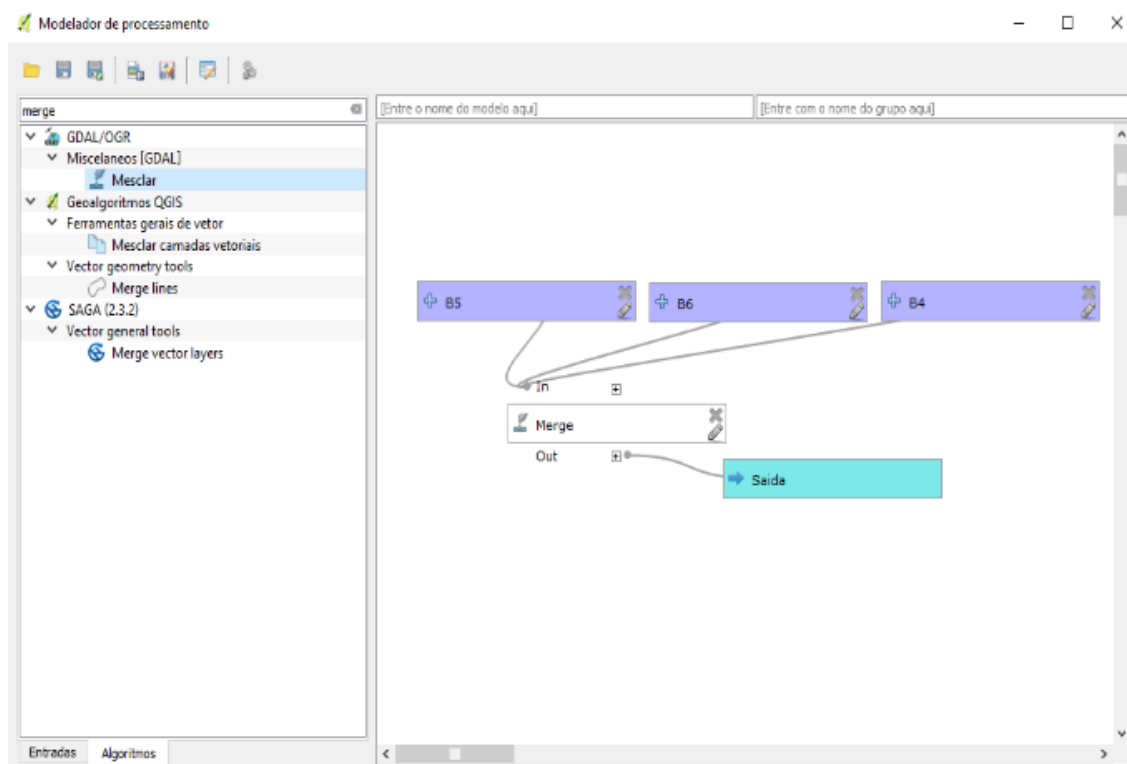
Na primeira etapa, as imagens foram adquiridas em Nível 2 (reflectância de superfície), ou seja, já passaram pelo processo de correção atmosférica, explicada por Sanches et al. (2011, p. 7564):

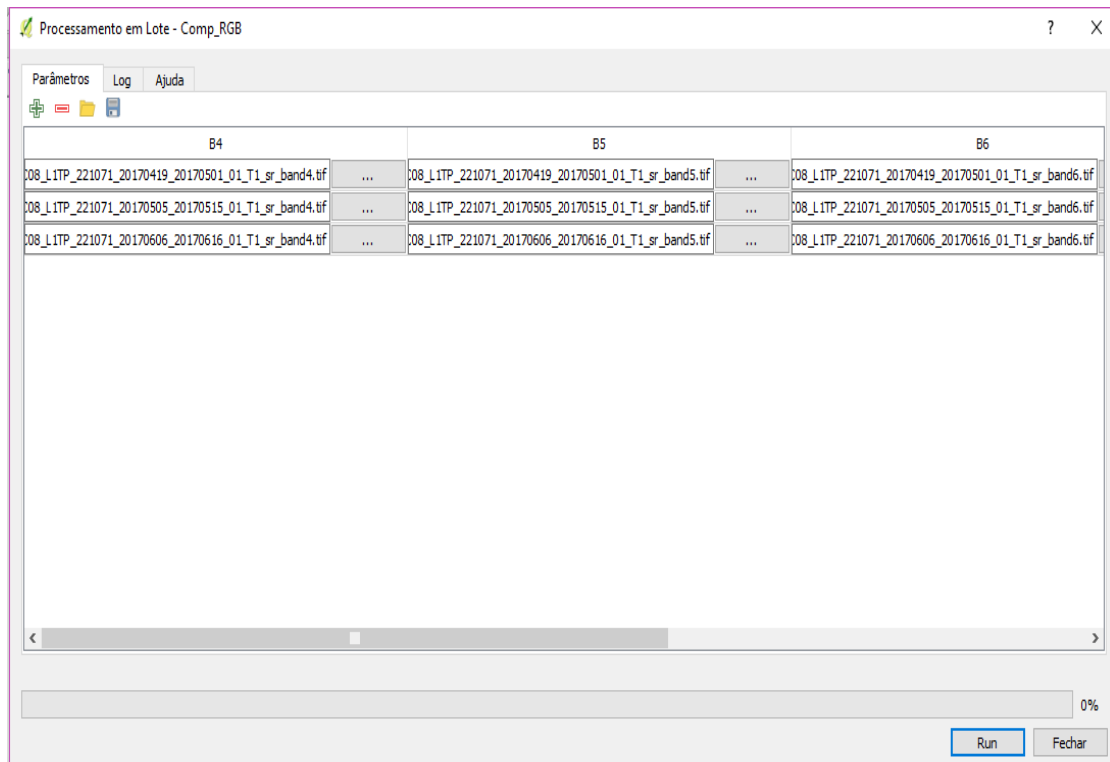
A correção atmosférica de imagens de satélite é feita com a intenção de minimizar os efeitos atmosféricos na radiância de uma cena, visto que a

atmosfera, por causa dos fenômenos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, afeta a radiação refletida pela superfície que é captada pelo sensor. (SANCHES, 2011, p. 7564)

Quanto à utilização das bandas, apenas três bandas foram selecionadas para o mapeamento, são elas: banda 4 (Red- 0,64-0,67  $\mu\text{m}$ ); banda 5 (NIR - Infravermelho próximo 0,85-0,88  $\mu\text{m}$ ) e banda 6 (SWIR-Infravermelho de ondas curtas 1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, realizou-se a composição colorida 5R6G4B com o objetivo de “destacar certas informações espectrais e melhorar a qualidade visual da imagem, facilitando a análise do fotointérprete” (FIGUEIREDO, 2005). Nessa composição colorida, tem-se a melhor identificação do alvo cana-de-açúcar em diferentes estádios fenológicos. Estas composições foram geradas por meio de um modelo (Figura 12) criado para processar lotes de dados no software QGIS 2.18, minimizando o trabalho do pesquisador.

Figura 12 – Modelo para geração de composições coloridas em lote.





Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

Todo conjunto de imagens do sensor OLI baixadas na USGS encontravam-se no sistema de projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), zonas: 22, 23 e 24 e *Datum* WGS84 (*World Geodetic System* 1984), no entanto, pelo fato de Minas Gerais ser o quarto maior estado do Brasil, faz com que ele englobe três zonas (22, 23 e 24) e, por isso, foi necessária a adoção de uma projeção cartográfica que contemplasse todo o território para que não ocorresse erros no processamento das imagens. Desse modo, a Projeção Cônica de Lambert foi utilizada, pois esta apresenta as seguintes características:

Projeção conforme, ou seja, mantém a forma em detrimento das dimensões, entretanto, esta propriedade torna-se inválida para altas latitudes;

Baseada num cone secante ao globo terrestre, produz dois paralelos padrões, que possibilitam a projeção de uma área maior com baixa deformação;

Os meridianos são linhas retas que convergem em um único ponto externo aos limites da projeção,

Os paralelos são círculos concêntricos, com centro no ponto de interseção dos meridianos, sendo ortogonal a estes; e

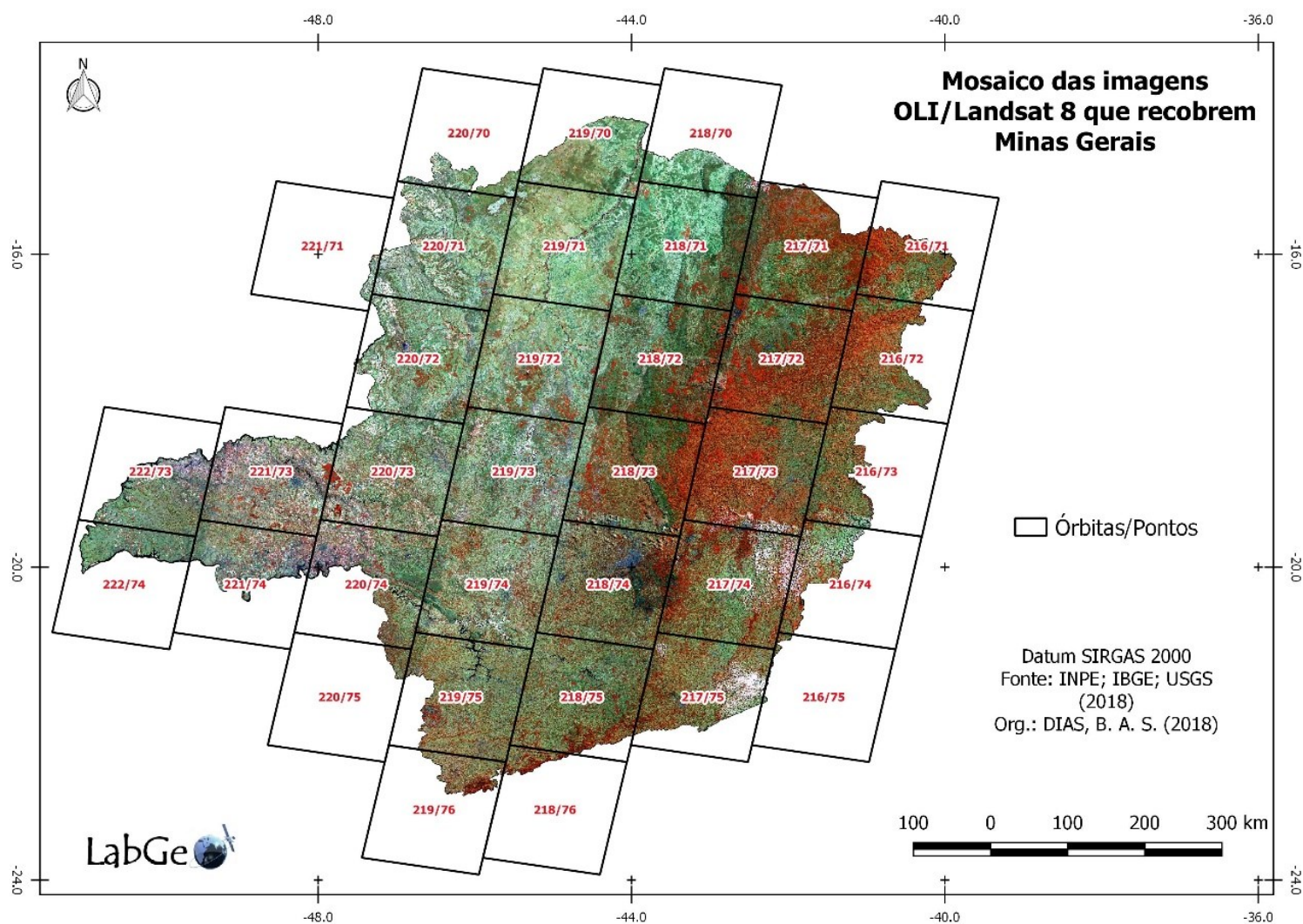
Emprega escalas reduzidas nos paralelos próximos do ponto de interseção dos meridianos e ampliadas no outro extremo. (RANGEL, 2003, p.52)

Para resolver esse problema, foi criada uma equação com o intuito de reprojeta-las de forma automática e em grandes quantidades, por isso, a ferramenta OSGeo4W *Shell* incluída

no conjunto de aplicativos do *software* QGis 2.18 foi empregada, ela permite operar várias bibliotecas relacionadas à análise de dados geoespaciais (GDAL, *Orfeo Toolbox*, e linguagem de *script* como o *Phyton*, etc.).

Após as imagens estarem em composição colorida 5R6G4B e no sistema de projeção *Lambert Conic*, um mosaico foi elaborado com todas as imagens do mês de setembro, depois um arquivo no formato *shapefile* do estado de Minas Gerais, disponibilizado pelo IBGE (2016), foi empregado para o recorte das imagens de acordo com a área de interesse, eliminando toda borda que não pertence ao estado. O mosaico alusivo ao mês de setembro encontra-se representado na Figura 13, no mosaico constituem-se as 35 imagens que cobrem o estado na composição 5R6G4B com as órbitas/pontos identificadas.

Figura 13 - Mosaico das imagens OLI/Landsat-8 na composição colorida 5R6G4B



Fonte: INPE, IBGE, USGS (2017)

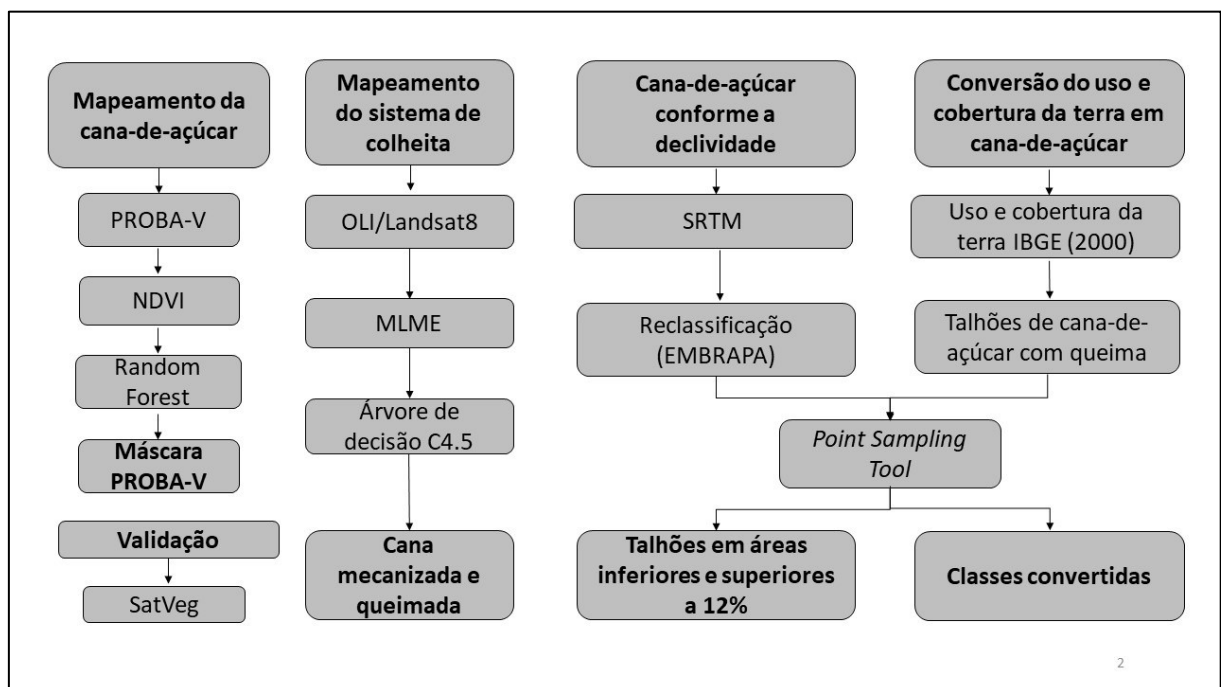


Para viabilizar o processo de classificação de forma que não ocorresse nenhum erro no processamento devido à grande quantidade de informações, novos recortes foram feitos, estes engendrados conforme critério de divisão regional do IBGE que são as mesorregiões, caracterizadas como:

uma área individualizada em uma Unidade da Federação que apresenta foras de organização do espaço geográfico definidas pelas seguintes dimensões: o processo social como determinante o quadro natural como condicionante e a rede de comunicação como elemento da articulação espacial. Estas três dimensões possibilitam que o espaço delimitado como mesorregião tenha uma identidade regional. Esta identidade é uma realidade construída ao longo do tempo pela sociedade que aí se formou (IBGE, 1990, p. 8)

A Figura 14 ilustra as etapas das atividades desenvolvidas posteriormente ao pré-processamento.

Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas na área estudada



Org.: Dias, B. A. S. (2018)

### 3.2.1 Mapeamento da cana-de-açúcar

Os dados de NDVI (S5-TOC-NDVI) obtidos pelo satélite PROBA-V não passaram por nenhuma técnica de filtragem. As imagens serviram para extração dos atributos e formação do modelo de conhecimento por classificação automática.

A classificação automática das imagens foi feita por classificador supervisionado *Random Forest* (RF) pelo *Google Earth Engine*. Foram utilizados atributos fenológicos, como: (1) início de ciclo, (2) final de ciclo, (3) tamanho de ciclo, (4) amplitude e (5) área abaixo da curva. Os atributos e amostras (Cana-de-açúcar = 1 e Não Cana = 0) formaram o modelo de conhecimento e as mesorregiões foram automaticamente classificadas *pixel a pixel*.

A classificação RF gerou uma imagem de probabilidade (0-100). Altos valores de probabilidade estão relacionados aos *pixels* que pertencem à classe cana-de-açúcar, e os *pixels* com menores valores possuem baixa probabilidade de ser cana-de-açúcar. Foram criados 12 intervalos de probabilidade: (probabilidade > 95, > 90, >85, >80, >75, > 70, > 65, > 60, > 55, > 50, > 45 e > 40) para a seleção dos *pixels* de cana. Dessa forma, foram geradas 12 máscaras de cana-de-açúcar, e o mapa utilizado foi o de 75% o que apresentou a área final mais próxima à área oficial declarada pelo IBGE.

### 3.2.2 Mapeamento do sistema de colheita da cana-de-açúcar

Essa etapa consiste na identificação do sistema de colheita da cana-de-açúcar. Para isso, antes da classificação, foi necessário extrair os atributos do mosaico referente ao mês de setembro inserido no *software* Spring 5.5.3. Nele, foi empregado a técnica do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para identificar o sistema de colheita da cana-de-açúcar, o procedimento segundo Shimabukuro e Smith (1991); Lobell e Asner (2004); e citado por Aguiar (2010, p.3) consiste em:

Uma técnica de análise subpixel e parte do princípio que o valor, na escala de cinza, assumido pelo pixel é uma combinação linear da refletância, em um determinado comprimento de onda, de diferentes alvos. Assim, cada pixel contém informação sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente dentro do elemento de resolução espacial do sensor.

Para executar a técnica do modelo de mistura é necessária a seleção dos alvos conforme os interesses, nesse caso, os alvos foram a cana-de-açúcar mecanizada, a cana-de-açúcar queimada e a cana-de-açúcar verde. E, com o intuito de gerar tais imagens fração, foi imprescindível a escolha de *pixels* puros (*endmembers*), por meio deles é possível quantificar as proporções contidas dentro do *pixel*, no qual esse não apresenta mistura de outros alvos.

Na seguinte equação, temos a representação do MLME proposta por Shimabukuro e Ponzoni (2017) para o monitoramento do desmatamento da Amazônia Legal:

$$r_i = a \text{ vege}_i + b \text{ solo}_i + c (\text{sombra/água})_i + e_i$$

Em que:

$r_i$  = resposta do pixel na banda  $i$ ;

$a$ ,  $b$  e  $c$  proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente;

$vege_i$  = resposta espectral da componente vegetação na banda  $i$ ;

$solo_i$  = resposta espectral do componente solo na banda  $i$ ;

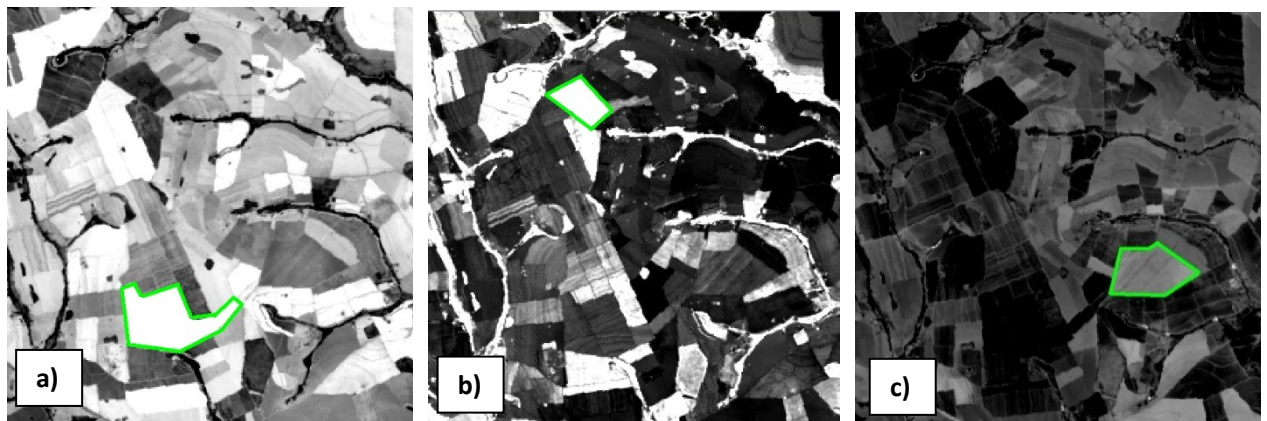
$água_i$  = resposta espectral da componente sombra ou água na banda  $i$ ;

$i$  = bandas do TM

$e_i$  = termo do erro para cada banda

No trabalho aqui desenvolvido, como escolhido anteriormente, o componente solo, vegetação e sombra foram substituídos pelos componentes cana-de-açúcar mecanizada (a), cana-de-açúcar verde (b) e cana-de-açúcar queimada (c). Abaixo, as imagens correspondentes a cada alvo determinado, nesse método, há redução da mistura do *pixel* e o realce os alvos de interesse (SHIMABUKURO E PONZONI, 2017).

Figura 15 – Resposta espectral dos componentes: Cana-de-açúcar mecanizada (a), Cana-de-açúcar verde (b), cana-de-açúcar com uso do fogo (c).



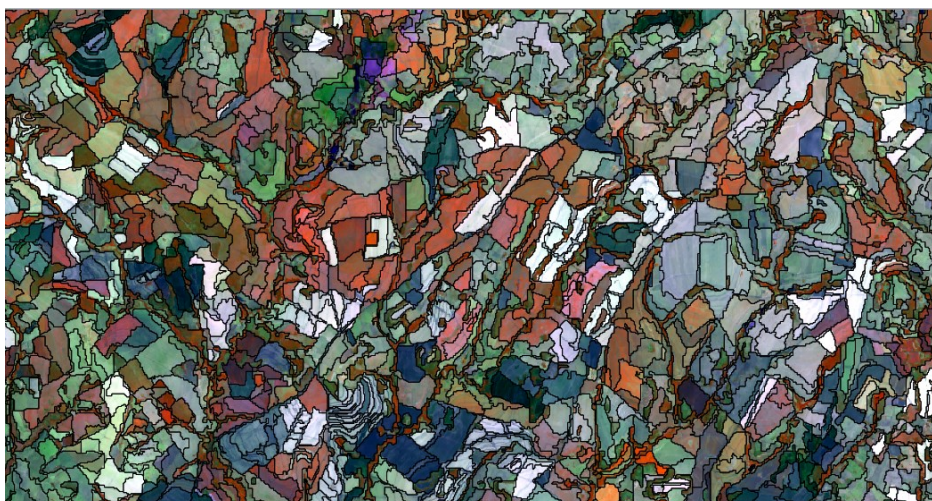
Fonte: Dias. B. A. S. (2018)

Vale ressaltar que as imagens em reflectância de superfície que compuseram o mosaico são dadas em 16 bits, no entanto, quando processadas no *software* Spring 5.5.3, as imagens fração derivadas da técnica do MLME são transformadas automaticamente em 8 bits. Nessa transformação, os valores numéricos dos *pixels* são modificados, por isso, a utilização dessas imagens fração deu-se apenas no processo de segmentação, que será descrito em seguida.

Na etapa de classificação das áreas de cana-de-açúcar, os procedimentos foram realizados no *software* InterIMAGE, inseriu-se o mosaico em 8 bits do mês de setembro e as imagens fração do MLME em 8 bits, a fim de gerar a segmentação da imagem. A técnica de segmentação fornece a base para construção da análise orientada a objeto por meio dos

segmentos ou regiões que contenham semelhanças espectrais. Para isso, o algoritmo de segmentação *multiresolution* agrupa os *pixels* ou objetos em regiões homogêneas. Segundo Baatz e Schäpe (2000), ele possui dois componentes: “a) *decision Heuristics to determine the image objects that will merge at each step*, b) *definition of a homogeneity of image objects to compute the degree of fitting for a pair of image objects*”. Os parâmetros adotados foram: o Fator escala (Fe), no qual determina a diferença máxima permitida para os objetos da imagem (30), a Compacidade (Cp), valor 0,5 usado para otimizar objetos compactos, e a Forma (Fm), baseada no desvio de uma forma compacta (ou suave) sendo 0,3 o valor atribuído (SCHULTZ et al. 2016; MATSUOKA e HAERTEL, 2007; TRIMBLE, 2014). Na Figura 16, um recorte do município de Uberaba na qual a segmentação foi obtida pelo programa.

Figura 16 – Resultado da segmentação de acordo com os parâmetros definidos



Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

Portanto, o seguinte passo deu-se com a inserção do mosaico em 16 bits e por meio da *Object-based Image Analysis* (OBIA), segmentos de amostras foram coletados para treinar as classes: cana-de-açúcar verde, cana-de-açúcar crua, cana-de-açúcar mecanizada e outros usos.

Após a coleta das amostras, foi gerada a classificação automática utilizando o algoritmo de classificação C4.5, segundo Debastiani et al. (2013, p.1).

é um classificador estatístico baseado no conceito de entropia, onde cada nó, o algoritmo determina qual padrão realiza uma melhor separação entre classes, gerando uma árvore univariada (onde cada regra é baseada em somente um atributo).

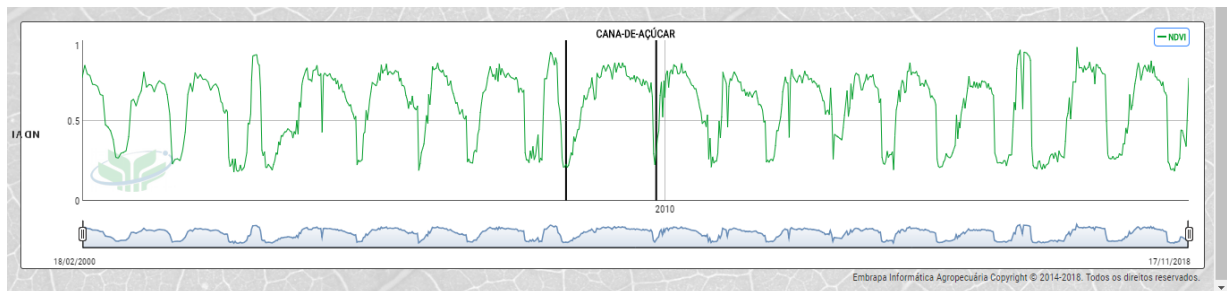
Com base no resultado obtido na classificação, as áreas classificadas como cana-de-açúcar juntaram-se às informações da máscara do PROBA-V de 75%, e por meio da ferramenta

de localização fez-se a seleção das áreas de maior probabilidade de serem cana-de-açúcar, e, posteriormente, as imagens multitemporais dos outros meses serviram para reclassificar as áreas, a fim de melhorar o resultado da classificação.

### 3.2.3 Validação do mapa temático da cana-de-açúcar

A validação da classificação deu-se com base em um conjunto de 1500 pontos sorteados aleatoriamente em Minas Gerais utilizando o QGIS 2.18, e posteriormente foram inseridos na plataforma digital do SatVeg, possibilitando a análise de séries temporais para interpretação de uso e cobertura da terra. A Figura 17 ilustra o comportamento da cana-de-açúcar na série temporal dos dados de NDVI para a cana-de-açúcar.

Figura 17 – Perfil da cana-de-açúcar na série de dados NDVI (SatVeg)



Fonte: SatVeg (2018)

Buscando os mesmos padrões da cultura, os 1500 pontos foram analisados um a um (Figura 18), e, com base na classificação automática e nos pontos de referência, foi realizada a validação, dada por matriz de confusão.

Figura 18 – Exemplo de um pixel classificado como cana-de-açúcar em Ituiutaba-MG



Fonte: SatVeg (2018)

Na posse dos dados validados pela série histórica do SatVeg, gerou-se a matriz de confusão, o Índice Kappa, Exatidão Global e erros de inclusão e omissão. O índice Kappa é uma técnica utilizada na avaliação da acurácia para determinar estatisticamente se uma matriz de erro é significativamente diferente de outra, baseia-se na diferença entre a classificação e os dados de referência (CONGALTON, 1957). O cálculo do coeficiente Kappa é dado pela seguinte fórmula:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c X_{ii} - \sum_{i=1}^c X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c X_{i+} X_{+i}}$$

Em que K é uma estimativa de Kappa;

$X_{ii}$  é o número de classes na linha i e coluna i;

$X_{i+}$  é a soma da linha i e  $X_{+i}$  é o total da coluna i;

n é o número total de observações;

c o número de linhas e de colunas das matrizes de erros.

### 3.2.4 Verificação das áreas mapeadas conforme legislação estadual

Conforme a Deliberação Normativa já citada anteriormente que regulamenta a prática da queima de cana-de-açúcar para fins de colheita, foi realizada a verificação das áreas colhidas em 2017 que estão ou não de acordo com a declividade citada na Deliberação.

As imagens do projeto SRTM foram utilizadas para obter os dados referente à declividade de Minas Gerais. Para todo estado, 74 imagens foram adquiridas pelo site *Earth Explorer* da USGS em 1 *Arc-second global* (30 metros), estas encontravam-se no sistema de geodésico mundial WGS 84.

De posse dos dados SRTM, no *software* QGis 2.18 essas imagens foram reprojctadas para a Projeção Cônica de Lambert, posteriormente, gerou-se um mosaico e com o *shapefile* do



estado fornecido pelo IBGE foi realizado o recorte da área de estudo. Em seguida, por meio da ferramenta *Slope* contida na biblioteca GDAL foi obtida a declividade do terreno expressa em porcentagem. E por meio do algoritmo do GRASS chamado *r.reclass* obteve-se as classes de declividade adotadas pela Embrapa, como mostrado na Quadro 11.

Quadro 11 – Classes de declividade segundo a Embrapa (1987)

| Declividade (%) | Discriminação                |
|-----------------|------------------------------|
| 0-3             | Relevo Plano                 |
| 3-8             | Relevo Suavemente Ondulado   |
| 8-12            | Relevo Ondulado*             |
| 12-20           | Relevo Ondulado              |
| 20-45           | Relevo Fortemente Ondulado   |
| 45-75           | Relevo Montanhoso            |
| >75             | Relevo Fortemente Montanhoso |

\*Classe subdividida para atender o critério da Deliberação Normativa COPAM nº133.

Fonte: Embrapa (1987)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2017)

O próximo passo foi inserir o arquivo contendo os talhões de cana-de-açúcar que foram colhidos com e sem o uso do fogo, e gerar pontos centrais por meio da ferramenta Centroides de Polígonos, tal ferramenta permite criar pontos no centro de talhões de cana-de-açúcar, mantendo os seus atributos. Visando evitar problemas posteriores em relação à união dos dados, coordenadas foram inseridas nos pontos. Com o *plugin Point Sampling Tool*, foi possível realizar a captura das informações da classe de declividade de cada talhão e, assim, uni-lo de acordo com sua localização geográfica ao arquivo de cana-de-açúcar.

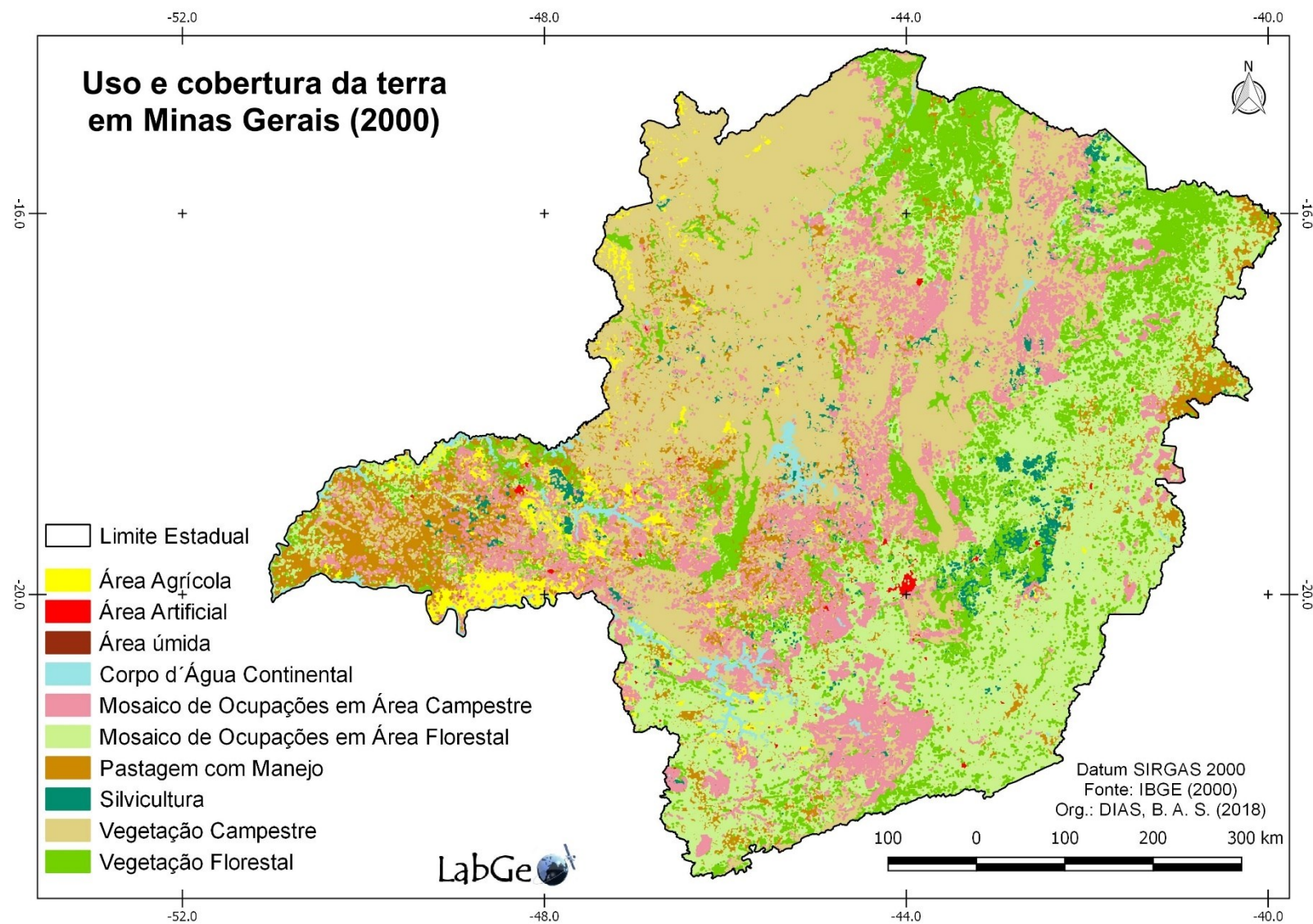
### 3.2.4 Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar

Para realizar o mapa de conversão de uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar, utilizou-se o arquivo de cana-de-açúcar obtido na classificação e o arquivo de uso e cobertura da terra fornecido pelo IBGE numa escala de 1: 1.000.000 para o ano de 2000, conforme ilustrado na Figura 19. No entanto, devido a escala não permitiu maiores detalhamentos pois temos a presença de ruídos que atrapalham a verificação concreta das classes do mapeamento.

No mapa disponibilizado pelo IBGE (2000), nove classes foram identificadas em Minas Gerais: 1) área agrícola, 2) área artificial, 3) área úmida, 4) corpos d'água continental, 5) mosaico de ocupações em área florestal, 6) mosaico de ocupações em área campestre, 7) pastagem manejo, silvicultura, 8) vegetação campestre, e 9) vegetação florestal (Quadro 12). Já o arquivo de 2017, contém apenas as áreas cultivadas com cana-de-açúcar no estado.



Figura 19. Mapa de uso e cobertura da terra em Minas Gerais (2000)



Quadro 12 - Descrição das classes de uso e cobertura da terra em Minas Gerais (IBGE, 2000)

| Classes de uso e cobertura da terra    |   |
|--|---|
| Classe                                 | Descrição   |
| Área Artificial                        | Áreas onde predominam superfícies antrópicas não agrícolas. São aquelas estruturadas por edificações e sistema viário, nas quais estão incluídas as metrópoles, as cidades, as vilas, as aldeias indígenas e comunidades quilombolas, as áreas de rodovias, os serviços e transportes, as redes de energia, as comunicações e terrenos associados, as áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas periurbanas. Também pertencem à essa classe as áreas onde ocorrem a exploração ou a extração de substâncias minerais, por meio de lavra ou garimpo. |
| Área Agrícola                          | Área caracterizada por lavouras temporárias, semiperenes e permanentes, irrigadas ou não, sendo a terra utilizada para a produção de alimentos, fibras e <i>commodities</i> do agronegócio. Inclui todas as áreas cultivadas, inclusive as que estão em pousio ou localizadas em terrenos alagáveis. Pode ser representada por zonas agrícolas heterogêneas ou extensas áreas de <i>plantations</i> . Inclui também os tanques de aquicultura.  |
| Pastagem com Manejo                    | Áreas destinadas ao pastoreio do gado e outros animais, com vegetação herbácea cultivada (braquiária, azevém, etc.) ou vegetação campestre (natural), ambas apresentando interferências antrópicas de alta intensidade. Essas interferências podem incluir o plantio; a limpeza da terra (destocamento e despedramento); eliminação de ervas daninhas de forma mecânica ou química (aplicação de herbicidas); gradagem; calagem; adubação; entre outras que descaracterizem a cobertura natural.  |
| Mosaico de Ocupações em Área Florestal | Área caracterizada por ocupação mista de agricultura, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área.   |
| Silvicultura                           | Área caracterizada por plantios florestais de espécies exóticas ou nativas como monoculturas.   |
| Vegetação Florestal                    | Área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Ombrófila Densa, de Floresta Ombrófila Aberta, de Floresta Estacional, além da Floresta Ombrófila Mista. Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 m de altura, como a Savana Florestada, Campinarana Florestada, Savana-Estépica Florestada, os Manguezais e os Buritizais, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).  |
| Área Úmida                             | Área caracterizada por vegetação natural herbácea (cobertura de 10% ou mais), permanentemente ou periodicamente inundada por água doce ou salobra. Inclui os terrenos de charcos, pântanos, campos úmidos, estuários, entre outros. O período de inundação deve ser de no mínimo dois meses por ano. Pode ocorrer vegetação arbustiva ou arbórea, desde que estas ocupem área inferior a 10% do total.  |

continua...

continuação...

| Classe                                       | Descrição   |
|--|---|
| Vegetação<br>Campestre                       | <p>Área caracterizada por formações campestres. Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversas da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as savanas, estepes, savanas- estépicas, formações pioneiras e refúgios ecológicos.</p> <p>Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidroarenosos litorâneos (restinga), conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013). Essas áreas podem estar sujeitas a pastoreio e a outras interferências antrópicas de baixa intensidade como as áreas de pastagens não manejadas do Rio Grande do Sul e do Pantanal.</p> |
| Mosaico de<br>Ocupações em<br>Área Campestre | Área caracterizada por ocupação mista de agricultura, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes campestres, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área.   |
| Corpo d'água<br>Continental                  | Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais de água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica).  |

(conclusão)

Fonte: IBGE (2018)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

Na posse dos dados, o procedimento utilizado para averiguar as classes convertidas em cana-de-açúcar seguiram os mesmos passos das áreas verificadas, de acordo com a legislação estadual (tópico anterior). Após cada talhão conter a classe que pertencia em 2000, foi estimada a área ocupada por cada categoria para o estado de Minas Gerais, logo, pelas mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Avaliação da classificação da cana-de-açúcar

O resultado da área ocupada com cana-de-açúcar em Minas Gerais apresenta-se na Tabela 4, os dados da estimativa são informados por mesorregião geográfica. O total estimado foi 837.829 ha, sendo o TMAP o maior produtor, seguido por Noroeste, Central, Sul/Sudeste, Oeste, Norte, Zona da Mata e Vale do Mucuri, respectivamente.

Tabela 4 – Contagem das áreas de cana-de-açúcar (ha) geradas pelo classificador C4.5

| Mesorregião                               | Total (ha)     |
|---|----------------|
| <b>Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba</b> | 653.740        |
| <b>Noroeste</b>                           | 64.795         |
| <b>Central</b>                            | 47.691         |
| <b>Sul/Sudeste</b>                        | 37.466         |
| <b>Oeste</b>                              | 14.052         |
| <b>Norte</b>                              | 10.533         |
| <b>Zona da Mata</b>                       | 8.029          |
| <b>Vale do Mucuri</b>                     | 1.523          |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>837.829</b> |

Fonte: Mapeamento (2017)

Org.: Dias, B. A. S. (2018)

Em números divulgados pelo IBGE, o valor de área plantada com cana-de-açúcar em Minas Gerais para o ano de 2017 foi de 906.497 ha, percebe-se que houve diferença de 68.668 ha, no entanto, várias hipóteses podem justificar tal divergência dos dados, dentre elas, a metodologia empregada. O IBGE coleta seus dados por meio de levantamentos diretos com aplicação de questionários aos técnicos, produtores e colaboradores que atuam na área, além do próprio conhecimento que o agente possui sobre as atividades agrícolas dos municípios ou região onde atua (IBGE, 2002), ao passo que o mapeamento aqui realizado se baseou na classificação automática de imagens multitemporais para o período de abril a outubro. O fato é que, na classificação automática, erros de omissão, comissão, exatidão ao usuário e ao produtor, Índice Kappa e Exatidão Global são avaliados, enquanto na metodologia empregada pelo IBGE tais informações não são passadas aos usuários, a análise, portanto, pode ser tendenciosa, resultando em possíveis superestimativas ou subestimativas (PICOLI et al., 2009).

De acordo com os dados, dos 122 pontos classificados como cana-de-açúcar, apenas 29 foram confundidos com outras classes de uso, alcançando Índice Kappa e Exatidão Global de 0,76 e 0,96, respectivamente. Isso mostra que a classificação automática apresentou bons

resultados, embora o erro de inclusão foi de 23,55% para cana-de-açúcar e 1,60% para os outros usos. Isso mostra que devido a alguns fatores como a semelhança espectral, as demais culturas podem ter sido confundidas (Tabela 5).

Tabela 5 – Matriz de confusão, Índice Kappa e Exatidão Global com base em 1500 pontos de referência.

| Valores em ha        |                | Referência     |        |       | Exatidão do Usuário | Erro de inclusão |
|----------------------|----------------|----------------|--------|-------|---------------------|------------------|
|                      |                | Cana-de-açúcar | Outros | Total |                     |                  |
| Classes              | Cana-de-açúcar | 93             | 29     | 122   | <b>76,23</b>        | <b>23,77</b>     |
|                      | Outros         | 22             | 1356   | 1378  | <b>98,40</b>        | <b>1,60</b>      |
|                      | Soma           | 115            | 1385   | 1500  |                     |                  |
| Exatidão do Produtor |                | 80,87          | 97,91  |       |                     |                  |
| Erro de omissão      |                | 19,13          | 2,09   |       |                     |                  |

Índice Kappa = 0,76 e Exatidão Global = 0,96.

Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

O desempenho da classificação foi considerado muito bom (Tabela 6), segundo os limiares apresentados por Congalton (1975):

Tabela 6 – Limiares do índice Kappa

| Índice Kappa       | Grau de concordância |
|--------------------|----------------------|
| $< 0$              | Péssimo              |
| $0 < k \leq 0,2$   | Ruim                 |
| $0,2 < k \leq 0,4$ | Razoável             |
| $0,4 < k \leq 0,6$ | Bom                  |
| $0,6 < k \leq 0,8$ | Muito Bom            |
| $0,8 < k \leq 1,0$ | Excelente            |

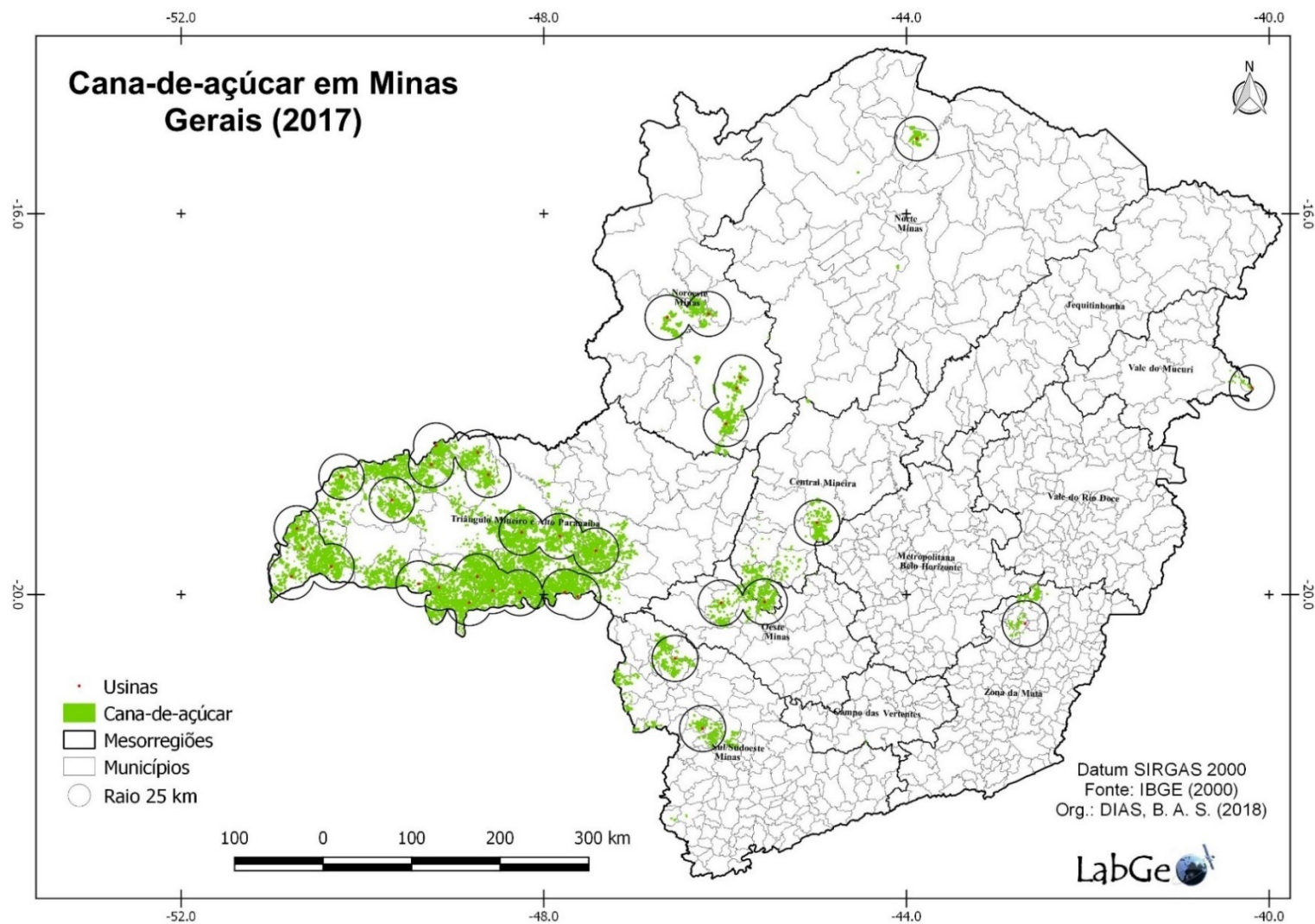
Fonte: Congalton (1975)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

De acordo com os autores Margarido e Santos (2013), a distância média da usina com as frentes de colheita é de 25 km, partindo desse pressuposto, na Figura 18, temos as áreas mapeadas de cana-de-açúcar e um raio de 25 km em torno das usinas. O dado mostra que em alguns pontos das mesorregiões do TMAP, Central, Zona da Mata e Sul/Sudeste essa média pode ser ainda maior, no entanto, os autores anteriormente citados alertam sobre a falta de matéria-prima em frentes de colheita a uma distância superior a 30 km, a não ser quando as condições das estradas viabilizam a operação.



Figura 20 – Mapeamento da cana-de-açúcar em Minas Gerais no ano de 2017

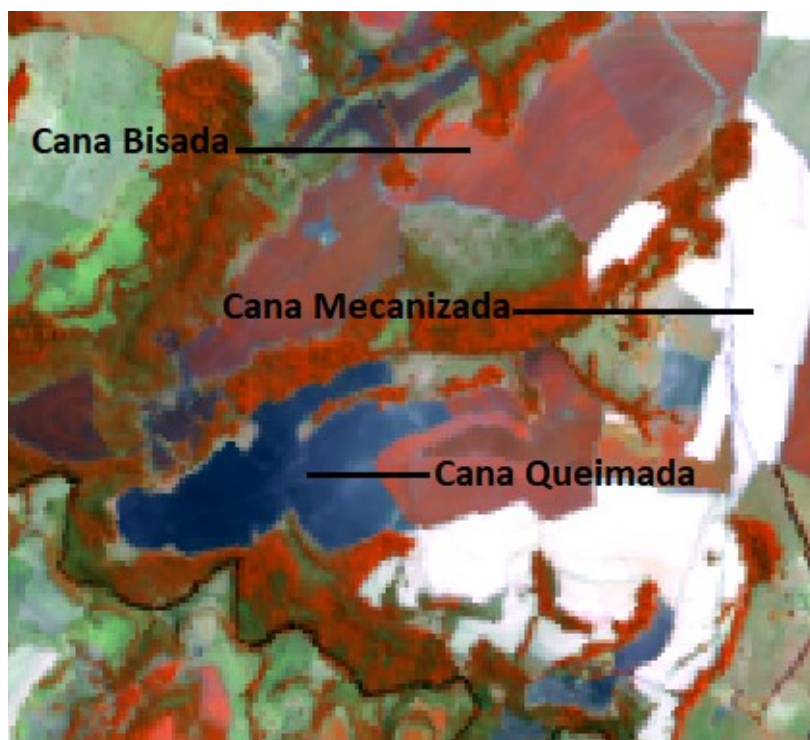


Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

## 4.2 Avaliação do sistema de manejo da cana-de-açúcar

O sistema de manejo da cana-de-açúcar foi observado no período de abril a outubro de 2017, com base no comportamento espectral das imagens. Por meio do MLME, houve um realce dos alvos de interesse, colaborando para melhor separação dos sistemas de colheita, entretanto, conforme Aguiar et al. (2009), os principais fatores que influenciam a identificação da colheita da cana-de-açúcar são as condições climáticas e o manejo da área colhida. Na Figura 21 é possível identificar na imagem OLI/Landsat8 os diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar em Minas Gerais (crua e mecanizada), além da cana-de-açúcar bisada, ou seja, a cana-de-açúcar que não colhida no período analisado (de abril a outubro).

Figura 21 – Identificação da cana-de-açúcar em diferentes modos de colheita em imagens OLI/Landsat8



Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

Percebe-se na Tabela 7 que mais da metade da área de cana-de-açúcar foi colhida mecanicamente (52%), ao passo que aquelas que empregaram o uso do fogo corresponderam a 11,4% (95.128 ha) e a cana-de-açúcar bisada correspondeu a 36,6% (306.898 ha).

Tabela 7 – Sistema de manejo da cana-de-açúcar (ha) em Minas Gerais (2017)

| Mesorregião                               | Crua           | Crua (%) | Queimada      | Queimada (%) | Bisada         | Bisada (%) | Total          |
|---|----------------|----------|---------------|--------------|----------------|------------|----------------|
| <b>Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba</b> | 318.922        | 49       | 85.130        | 13           | 249.688        | 38         | 653.740        |
| <b>Noroeste</b>                           | 41.392         | 64       | 344           | 0,5          | 23.059         | 35,5       | 64.795         |
| <b>Central</b>                            | 28.613         | 60       | 3.642         | 8            | 15.436         | 32         | 47.691         |
| <b>Sul/Sudeste</b>                        | 20.898         | 56       | 3.430         | 9            | 13.138         | 35         | 37.466         |
| <b>Oeste</b>                              | 8.780          | 62,5     | 1.413         | 10           | 3.859          | 27,5       | 14.052         |
| <b>Norte</b>                              | 10.533         | 100      | -             | -            | -              | -          | 10.533         |
| <b>Zona da Mata</b>                       | 6.348          | 79       | 742           | 9            | 939            | 12         | 8.029          |
| <b>Vale do Mucuri</b>                     | 317            | 51       | 427           | 28           | 779            | 21         | 1.523          |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>435.803</b> |          | <b>95.128</b> |              | <b>306.898</b> |            | <b>837.829</b> |

Fonte: Mapeamento (2017)

Org.: Dias, B. A. S. (2018)

A colheita da cana-de-açúcar utilizando o sistema mecanizado sem fogo está cada vez mais presente no sistema de produção agrícola brasileiro. Chama atenção o fato de que os dados obtidos na pesquisa se mostram divergentes com os dados apontados pela Conab (2017), citados anteriormente, de acordo com a fonte, 99,5% da cana-de-açúcar de Minas Gerais utiliza a colheita mecanizada, enquanto 52% foi o valor observado nesse mapeamento. Essa divergência resulta da metodologia empregada, pois os dados da Conab são obtidos por meio das informações coletadas pelos técnicos em visitas às unidades de produção em atividade em todo o país. Além disso, os dados da Conab são estimados conforme a área colhida, e não em relação à área total produzida.

Um aspecto importante a destacar é que a região Centro-Sul, maior região produtora de cana-de-açúcar do país, teve um grande avanço em relação ao sistema de manejo da cana-de-açúcar, o índice de colheita mecanizada saiu de 28,5% para 95,6% nos últimos dez anos (CONAB, 2018). As vantagens da colheita mecanizada vão além dos aspectos econômicos, são elas: a redução do uso de água utilizada no processo industrial; a limpeza a seco da cana-de-açúcar; a redução do uso de herbicidas; a redução do tempo de determinadas tarefas; melhor aproveitamento da cana-de-açúcar do ponto de vista energético; toda fonte de energia elevada para indústria; melhor qualidade da matéria entregue para industrialização; a mecanização evita a emissão de gases de efeito estufa; com a palhada deixada sobre o solo, tem-se a proteção dos nutrientes e umidade do solo, aumentando o teor de matéria orgânica e fertilidade do solo, além de evitar a compactação (ROSSETTO, s.d). Dentre as principais desvantagens estão:



- Dificuldade de mão-de-obra disponível para a adoção da técnica e resistência do próprio cortador em executá-la;
- Desempenho de corte menor, tanto manual como mecânico, implicando em maiores custos de produção; aumento de matérias estranhas – vegetal e mineral – na matéria-prima;
- Tendência de apresentar corte basal mais elevado, provocando perdas de matéria-prima e prejudicando a brotação da soqueira;
- Maior foco de infestação para alojamento das pragas;
- Impossibilidade de utilização dos implementos tradicionais nos tratos culturais de adubação e cultivo;
- Perigo de fogo accidental no período de entressafra e durante a colheita;
- Cuidado na escolha de variedades apropriadas;
- Aumento da incidência de acidentes de trabalho no corte de cana crua (o uso do facão pode provocar cortes e a folha da cana pode ferir os olhos);
- Menor brotação de soqueiras em algumas variedades;
- Na cana crua há maior incidência de animais peçonhentos, que podem provocar sérios acidentes durante o corte manual;
- Maior incidência de broca e cigarrinha-da-raiz. (ROSSETTO, s.d)

Quanto aos aspectos sociais, a mecanização ao mesmo tempo que expulsou os trabalhadores de baixa escolaridade, aumentou a demanda por profissionais mais qualificados, alterando o perfil dos trabalhadores, agora com oportunidades para tratoristas, motoristas, mecânicos, condutores de colheitadeiras, técnicos em eletrônica, dentre outros. (MORAES, 2007). Em 2006, o Brasil contava com 529.251 trabalhadores do setor sucroenergético, ao passo que em 2015 esse número foi para 536.249 empregados. Esse baixo crescimento pode ser resultado da modernização tecnológica do setor, na qual as ocupações relacionadas ao cultivo de cana são responsáveis pela maior queda, passando de 184.911 trabalhadores (2006) para 137.484 em 2015. (NAKABASHI et al., 2017).

Com o intuito de facilitar o corte manual, o uso do fogo nos canaviais tem sido eliminado gradativamente na indústria sucroenergética, a porcentagem de 11,4% obtida no mapeamento mostra a tendência de eliminação, visto que em 2007 esse percentual chegava a quase 76% (CONAB, 2018). Dentre os principais motivos para redução/eliminação da queima prévia do canavial estão as pressões ambientalistas com alegações inerentes aos danos ao meio ambiente e à saúde da população.

Os impactos ambientais, sociais e econômicos relacionados à produção da cana-de-açúcar são apresentados de acordo com Andrade e Diniz (2007, p. 34),

- Redução da biodiversidade, causada pelo desmatamento e pela implantação de monocultura;

- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do solo, por meio da prática excessiva de adubação química, corretivos minerais e aplicação de herbicidas e defensivos agrícolas;
- Compactação do solo, pelo tráfego de máquinas pesadas, durante o plantio, tratos culturais e colheita;
- Assoreamento de corpos d'água, devido à erosão do solo em áreas de reforma;
- Emissão de fuligem e gases de efeito estufa, na queima, ao ar livre, de palha, durante o período de colheita;
- Danos à flora e fauna, causados por incêndios descontrolados;
- Consumo intenso de óleo diesel, nas etapas de plantio, colheita e transporte;
- Concentração de terras, rendas e condições subumanas do trabalho do cortador de cana;

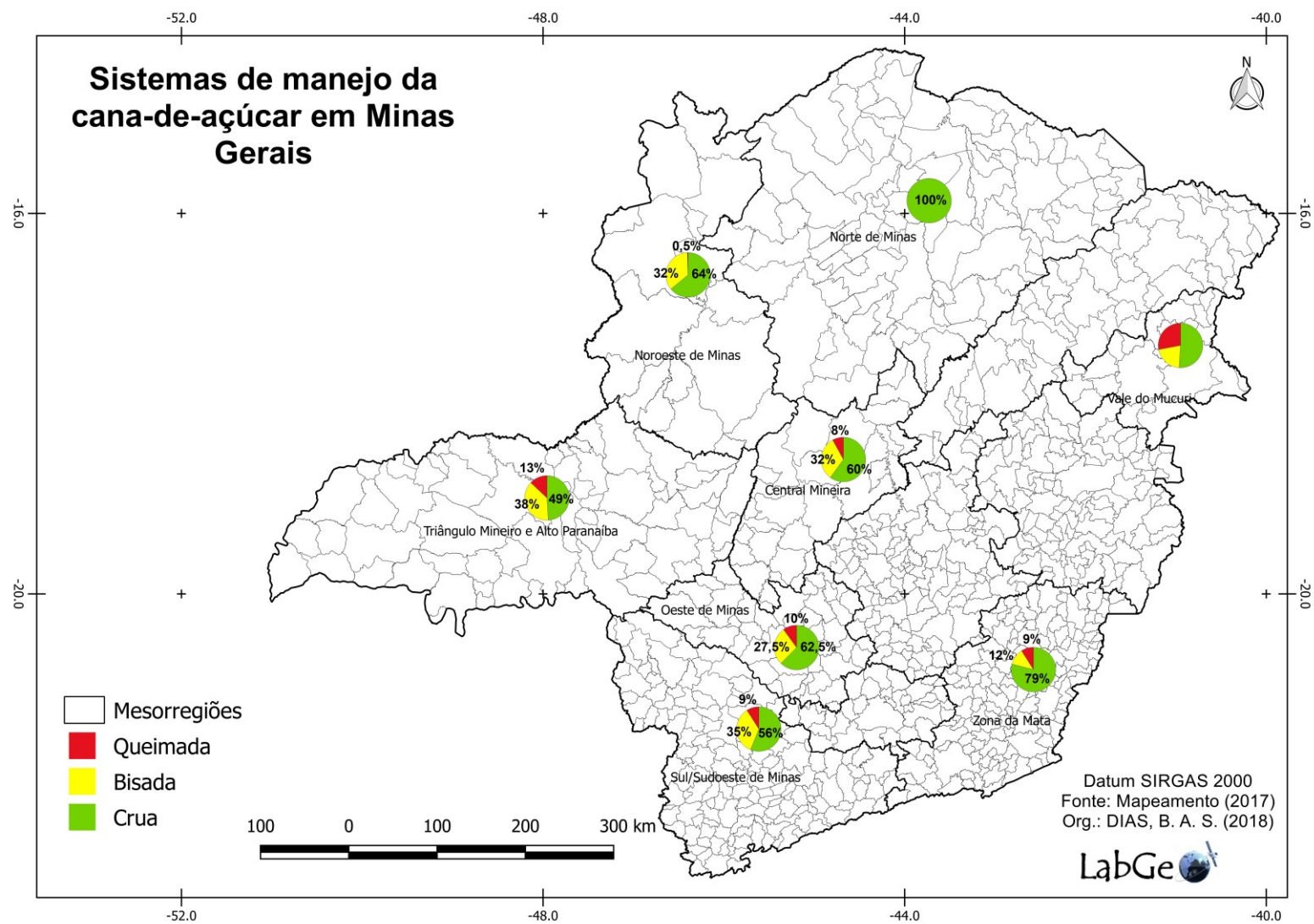
Em relação à cana-de-açúcar bisada, denominação dada às canas que permanecem dois verões no campo (COSTA et al., 2014), 36,6% da área total de cana-de-açúcar foi atribuída à essa classe. Ou seja, aquela cana-de-açúcar cuja identificação foi impossibilitada de ser identificada no período analisado. As condições climáticas, falta de tempo, falta de planejamento ou problemas durante a safra são alguns dos fatores que levam a deixar a cana-de-açúcar, que deveria ser colhida, para a safra seguinte. No entanto, pode acarretar em maiores quantidades de impurezas vegetais e minerais devido ao tombamento e o enraizamento aéreo (CANAONLINE, 2016).

Omwoma et al. (2014, p.215) apontam algumas estratégias sustentáveis na gestão da produção e processamento da cana-de-açúcar:

- *It is important to realize that sugarcane is an important plant that helps in sequestration of carbon dioxide; a greenhouse gas.*
- *In order to manage soil acidification that arises out of nitrogenous fertilizer use in sugarcane production, the use of 650 kg/ha or 965 kg/ha of  $\text{CaCO}_3$  to neutralize acid generated by 180 kg/ha of urea or diammonium phosphate respectively is recommended. Alternatively, use of basic nitrate fertilizers such as  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  is advised.*
- *In order to avoid contamination of aquatic systems within sugarcane plantation zones, use of pesticides according to label recommendations is paramount. In addition, correct weather forecast accompanied with precise timings in pesticide and fertilizer application will greatly reduce aquatic contamination due to surface runoffs and wash offs. Furthermore, region/site specific fertilizer requirement is significantly important both economically and for aquatic health protection.*
- *Sugarcane bagasse is economically important in industrial production of bioethanol, biohydrogen, lignin, hemicelluloses and activated carbon and as effective pollutant adsorbents.*
- *Sugarcane forage can be used as an effective fodder resource for feeding ruminants during dry seasons.*
- *Sugarcane molasses are effective in production of antioxidants, butanol, lipids, acetate, butyrate, ethanol, hydrogen etc.*

Estudos como o de Campos (2003) avaliam a potencialidade do sistema de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono. O estudo apontou que no sistema de manejo sem queima o carbono que seria emitido durante a prática da queima permanece e incorpora-se ao solo, enquanto durante a queima a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  liberou uma significativa quantidade desse gás do efeito estufa ( $4,3 \text{ Mg C-CO}_2 \text{ há}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). No sistema sem queima,  $1500 \text{ kg C.ha}^{-1}$  foi a quantidade estocada de carbono, demonstrando que o sistema de manejo sem queima pode atuar de maneira significativa no sequestro do carbono.

Figura 22 – Sistemas de manejo da cana-de-açúcar em Minas Gerais (2017)



Fonte: Dias, B. A.S. (2018)

### 4.3 Avaliação da cana-de-açúcar e as queimadas conforme declividade

As áreas mecanizáveis (abaixo de 12%) e as áreas não mecanizáveis (acima de 12%) onde a cana-de-açúcar foi queimada em Minas Gerais são mostradas na Figura 23 e na Tabela 8. É possível observar que 95.128 ha de cana-de-açúcar foram queimados em Minas Gerais, desse total, 89,5% estão localizadas no TMAP, levando em conta que é o maior produtor do estado, consequentemente, foi o que apresentou a maior área com queimadas.

As áreas apropriadas à mecanização ocuparam 88.414 ha, sendo as mesorregiões do TMAP, Central e Sul/Sudeste as que tiveram as maiores áreas com declividade abaixo de 12%, isso significa que as áreas com cana-de-açúcar que empregaram o uso do fogo na pré-colheita estão em declividade apropriada para mecanização. Segundo Ronquim (2010), os principais motivos para a utilização do fogo nos canaviais são o aumento do rendimento do corte, a melhoria no cultivo e em novos plantios e a eliminação de impurezas. Apesar das usinas sucroenergéticas substituírem o corte manual pela máquina, o fogo ainda é utilizado na espera de melhores rendimentos da produção (JENDIROBA, 2007).

Estudos como o de Marinho e Kirchhoff (1991) apontam os impactos da queimada da palhada da cana-de-açúcar em São Paulo. De acordo com os autores, as queimadas representam intensa fonte de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), aumentando a concentração de três a seis vezes durante a estação seca em relação à estação chuvosa.

Para as áreas em declividade superiores a 12%, totalizaram 6.714 ha, o TMAP, o Sul/Sudeste e a Zona da Mata obtiveram os maiores números em área de cana-de-açúcar queimada. Nessa declividade, tem-se o risco de tombamento das colhedoras, além da dificuldade de o transporte acompanhar a máquina, no entanto, mesmo a Deliberação Normativa da COPAM (2009) estabelecendo o prazo para o fim da queima para o ano de 2014, percebe-se que o setor ainda está se adaptando. Uma das alternativas para colheitas em declividades acima de 12% são as colhedoras de esteiras, estas chegam a colher em solos com declividade até 23% (CHERUBIM, 2018).

Fatores econômicos, ambientais e sociais corroboram na tentativa de eliminar a queima, dentre as vantagens da mecanização estão a redução dos custos de produção e das emissões de gases do efeito estufa, o aumento da mão-de-obra especializada e o rendimento operacional.

Tabela 8 – Área (ha) queimada nos municípios produtores de cana-de-açúcar em Minas Gerais conforme as classes de declividade de 0 a 12% e >12%.

| <b>Mesorregião</b>                        | <b>Área queimada em declividade de 0 a 12%</b> | <b>Área queimada em declividade de 0 a 12% (%)</b> | <b>Área queimada em declividade &gt; 12%</b> | <b>Área queimada em declividade &gt; 12% (%)</b> | <b>Área (ha) Total</b> |
|---|--|--|--|--|------------------------|
| <b>Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba</b> | 81.285   | 95,5   | 3.845  | 4,5  | 85.130                 |
| <b>Noroeste</b>                           | 316  | 91,8   | 28   | 8,2  | 344                    |
| <b>Central</b>                            | 3.198  | 87,8   | 444  | 12,2   | 3.642                  |
| <b>Sul/Sudeste</b>                        | 2.027  | 59,1   | 1.403  | 40,9   | 3.430                  |
| <b>Oeste</b>                              | 1.119  | 79,1   | 294  | 20,9   | 1.413                  |
| <b>Norte</b>                              | -  | -  | -  | -  | -                      |
| <b>Zona da Mata</b>                       | 42   | 6,7  | 700  | 94,3   | 742                    |
| <b>Vale do Mucuri</b>                     | 427  | 100  | -  | -  | 427                    |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>88.414</b>                                  |  | <b>6.714</b>                                 |  | <b>95.128</b>          |

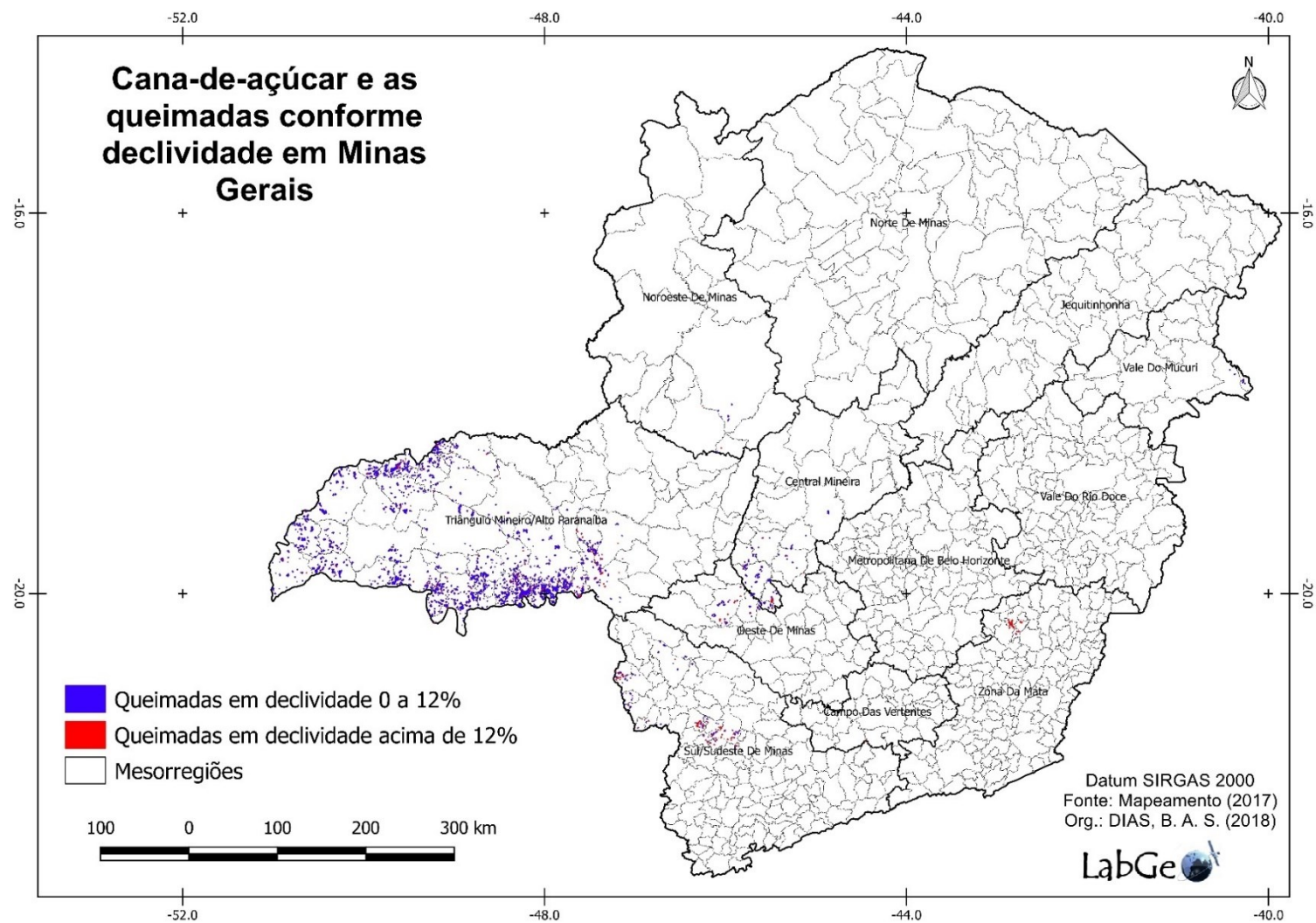
Fonte: Mapeamento (2017)

Org.: Dias, B. A. S. (2018)

Independente do sistema de colheita a ser utilizado, haverá perdas de matéria. No entanto, após o uso do fogo na pré-colheita, a cana-de-açúcar deve ser transportada em no máximo 36 horas para que não ocorra perdas significativas, mas se exposta ao tempo, a cana-de-açúcar queimada pode sofrer desidratação, perdas de açúcares e se deteriorar (RIPOLI e RIPOLI, 2013).

Das oito mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar em Minas Gerais, sete empregaram o uso do fogo nos canaviais, e a maior parte dessas áreas situadas abaixo de 12% são aptas a mecanização, injustificando tal uso.

Figura 23 – Cana-de-açúcar e as queimadas conforme declividade em Minas Gerais (2017)



Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

#### 4.4 Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar

Os resultados apontam que, com base no mapeamento de uso e cobertura da terra de 2000 e do mapeamento da cana-de-açúcar (2017), a classe área agrícola com 442.991 ha (53%) apresentou a maior área convertida em cana-de-açúcar. Ressalta-se que, nessa classe, os dados do mapeamento do IBGE de uso e cobertura da terra não separaram a cana-de-açúcar das demais culturas, por isso, para demonstrar os valores que correspondiam a área disponível a colheita da cana-de-açúcar em 2000 foi utilizado os dados da Produção Agrícola Municipal do IBGE, apontando que 292.571 ha já estavam ocupados pela cana-de-açúcar, avanço de 150.420 ha.

Tabela 9 – Mudanças de uso da terra para cana-de-açúcar em Minas Gerais

| Mesorregião                               | Área Agrícola  | Área Artificial | Mosaico de ocupação campestre | Mosaico de ocupação em área florestal | Pastagem com manejo | Silvicultura  | Vegetação Campestre | Vegetação Florestal | Corpos d'água | Área (ha) Total |
|---|----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| <b>Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba</b> | 353.488        | 129             | 43.785                        | 49.031                                | 148.105             | 2.497         | 49.731              | 6.563               | 411           | 653.740         |
| <b>Sul/Sudeste</b>                        | 23.566         | -               | 915                           | 9.201                                 | 3.156               | 93            | 188                 | 237                 | 110           | 37.466          |
| <b>Zona da Mata</b>                       | 5.476          | -               | 456                           | 1.575                                 | 522                 | -             | -                   | -                   | -             | 8.029           |
| <b>Central</b>                            | 22.231         | -               | 3.665                         | 1.653                                 | 12.527              | 788           | 5.968               | 859                 | -             | 47.691          |
| <b>Noroeste</b>                           | 30.981         | -               | 2.145                         | -                                     | 13.756              | 17.577        | -                   | 336                 | -             | 64.795          |
| <b>Oeste</b>                              | 7.249          | -               | 656                           | 360                                   | 3.407               | -             | 970                 | 1.410               | -             | 14.052          |
| <b>Norte</b>                              | -              | -               | -                             | 8.064                                 | -                   | 385           | 229                 | 1.855               | -             | 10.533          |
| <b>Vale do Mucuri</b>                     | -              | -               | -                             | 1.148                                 | 375                 | -             | -                   | -                   | -             | 1.523           |
| <b>TOTAL</b>                              | <b>442.991</b> | <b>129</b>      | <b>51.622</b>                 | <b>71.032</b>                         | <b>181.848</b>      | <b>21.340</b> | <b>57.086</b>       | <b>9.991</b>        | <b>521</b>    | <b>837.829</b>  |

Fonte: Mapeamento (2017)

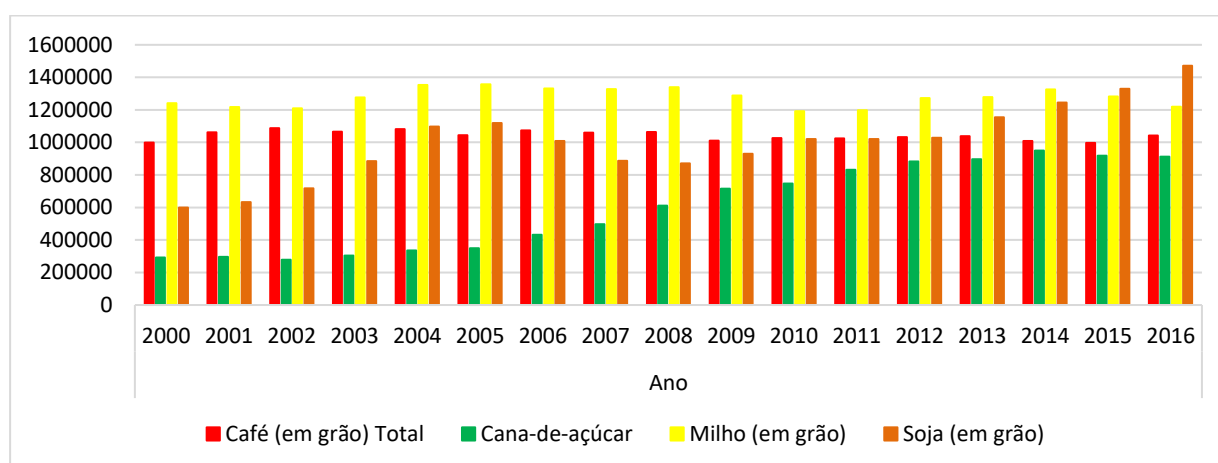
Org.: Dias, B. A. S. (2018)

Segundo Santos (2017), uma das principais implicações ambientais e socioeconômicas do setor sucroenergético é a diminuição de outros cultivos alimentares causada pela agressiva ocupação e substituição de áreas de outros cultivos alimentares e pastagens pela cana-de-açúcar. De fato, houve uma considerável diminuição na área plantada de abacaxi, algodão, amendoim, arroz, ervilha, fava, feijão, figo, fumo, laranja, mamona, mandioca, manga, maracujá, marmelo, melão, milho, palmito e pera em Minas Gerais, de 2000 para 2016 (IBGE). No entanto, não se associa exclusivamente à expansão da cana-de-açúcar, já que outras culturas como a da soja teve um aumento na área plantada ou destinada à colheita, mas ajuda a compreender as possíveis causas dessa conversão.



Conforme observa-se no Gráfico 5, em Minas Gerais, as áreas plantadas ou destinadas à colheita da cana-de-açúcar aumentaram em 211,6%, maior percentual de crescimento, ainda que apresente a menor área das demais culturas. A soja, que apresenta a maior área de plantio, teve um acréscimo de 145,35%, o milho um decréscimo de 1,72% e o café um incremento de 4,31% para o período analisado.

Gráfico 5 – Área plantada ou destinada à colheita (ha) das principais culturas de Minas Gerais no período de 2000 a 2016



Fonte: IBGE (2000-2016)

Org. e adaptação: Dias, B. A. S. (2018)

A maior área agrícola convertida em cana-de-açúcar foi no TMAP, com 353.488 ha, esse dado vai de encontro aos dados apresentados por Vieira e Rosendo (2015). Segundo as autoras, 67,41% das áreas de cana-de-açúcar em 2011 pertenciam à classe agricultura em 2002. Por ambos os mapeamentos utilizarem mapas de uso e cobertura da terra nos quais as áreas de cana-de-açúcar estão agregadas à classe agricultura, é possível averiguar com o auxílio dos dados do IBGE que a expansão da cana-de-açúcar foi notória.

Outros autores como Nassar et al. (2008) mostraram que a maior parte da expansão das áreas de cana-de-açúcar ocorreram nas classes de agricultura e pastagem, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Paraná e Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, com exceção do último estado, a classe agricultura foi a que registrou maior área substituída pela cana-de-açúcar. Castro et al. (2010) também observaram nas microrregiões de Meia Ponte e Quirinópolis no sul goiano a substituição das culturas anuais, principalmente a soja, sendo ocupadas pela cana-de-açúcar.

Em segundo lugar, estão as áreas de pastagens com 181.848 ha (21,7%), tendo em vista que a área total conforme Censo do ano de 2006 do IBGE foi de 18.217.880 ha, pode-se observar que a expansão da cana-de-açúcar no estado avançou quase 1% sobre as áreas de pastagens.

Dados do Banco Mundial (2010) mostraram que, devido à baixa produtividade das pastagens no Brasil, a intensificação das pastagens é uma das alternativas para viabilizar a expansão das lavouras e florestas de produção sem efeito sobre a fronteira agrícola. De acordo com a fonte, 126 milhões de hectares sem nenhum impedimento eram apropriados para expansão agrícola e florestas de produção sem a necessidade de desmatamento.

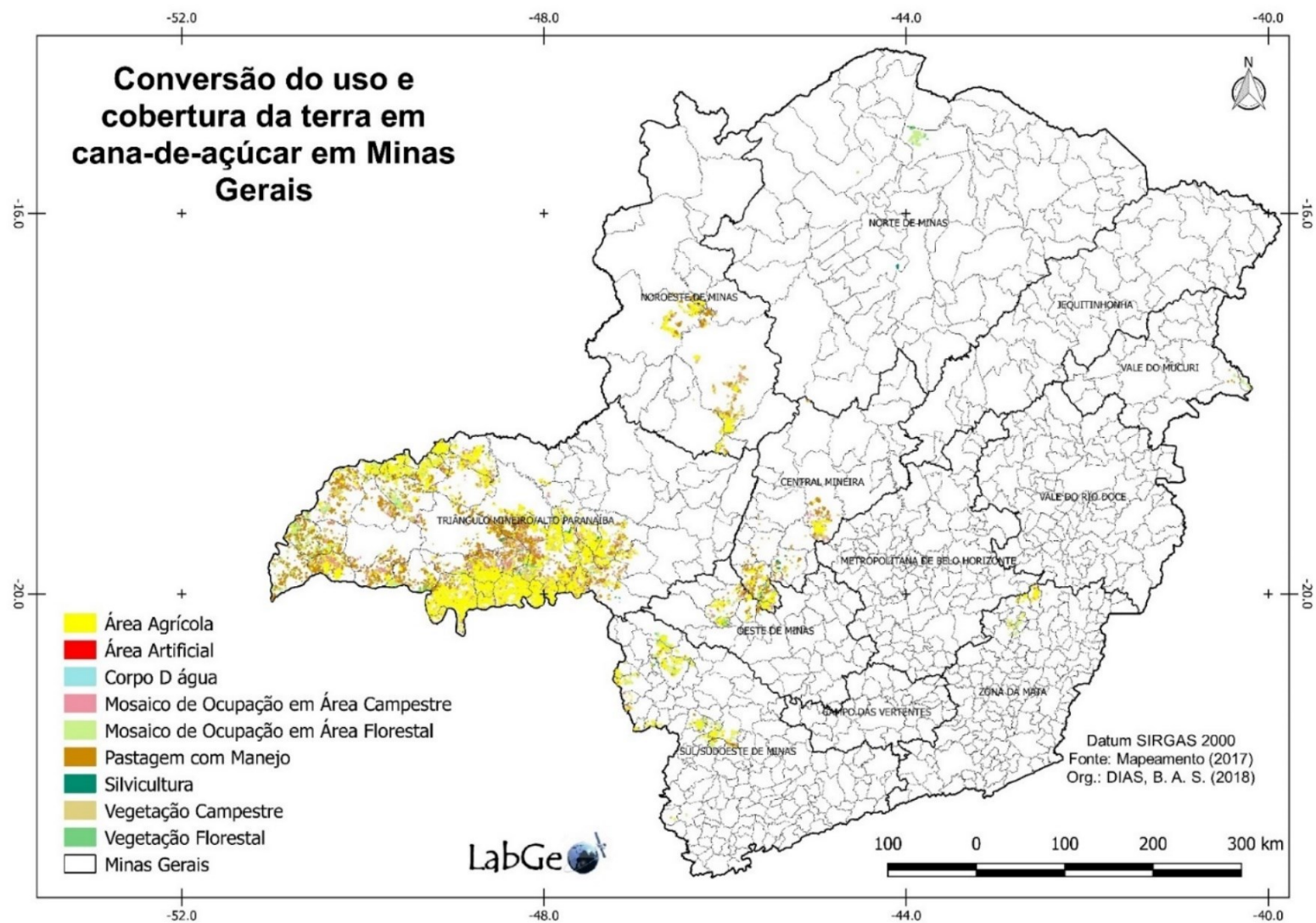
O estudo realizado por Cherubin (2016) mostrou que a cana-de-açúcar teve pequenos impactos sobre os atributos físicos do solo quando comparado aos pastos. Enquanto a conversão do pasto para cana-de-açúcar melhorou a qualidade química do solo, corrigindo a acidez e aumentando os níveis de macronutrientes, a conversão da vegetação em pastagem extensiva provocou grandes danos ao solo, como acidificação do solo, depleção de carbono orgânico e macronutrientes, e compactação.

Em terceiro lugar, com 71.032 ha (8,5%), o mosaico de ocupação em área florestal; seguido pela vegetação campestre com 57.086 ha (6,8%); mosaico de ocupação campestre com 51.622 ha (6,2%); silvicultura com 21.340 ha (2,5%); vegetação florestal com 9.991 ha (1,2%); corpos d'água com 521 ha (0,08) e área artificial com (0,02%), como mostrado na Tabela 9 e Figura 24.

As mudanças no sistema do cultivo agrícola brasileiro possibilitaram o crescimento das monoculturas em todo o país por meio de subsídios externos de empréstimos, abertura do mercado interno, modernização da agricultura, crédito agrícola, subsídios fiscais, melhorias na infraestrutura viária, industrial e energética. Essas foram as principais medidas impulsionadoras do avanço do setor agrícola.

Esses dados relevam que a notável expansão da cana-de-açúcar tem contribuído para o crescimento econômico do estado, principalmente na mesorregião do TMAP, no entanto, se por um lado o setor demanda abertura de novas áreas para cultivo, por outro, as preocupações em relação aos impactos ambientais, sociais e econômicos ascendem.

Figura 24 – Conversão do uso e cobertura da terra em cana-de-açúcar em Minas Gerais, ano base 2000.



Fonte: Dias, B. A. S. (2018)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A expansão da cana-de-açúcar em Minas Gerias impulsionou a economia do estado, principalmente na mesorregião do TMAP, onde apresenta a maior quantidade de usinas destinadas ao cultivo de açúcar e álcool, consequentemente, é a região que apresenta os maiores impactos socioambientais em decorrência da expansão, principalmente em relação à queimada da palhada que contribui para o efeito estufa.

A utilização das imagens do sensor OLI/Landsat 8 possui grande potencial de aplicação nas mais diversas áreas. As imagens, obtidas de forma gratuita e com resolução espacial de 16 dias, apresentam-se como opção favorável no mapeamento da cana-de-açúcar, visto que seu ciclo varia de 360 (cana-de-ano) a 540 dias (cana-de-ano-e-meio).

A aplicação do algoritmo de classificação C4.5 mostrou-se promissor quanto à classificação da cana-de-açúcar, apresentando Índice Kappa de 0,76 e Exatidão Global = 0,96.

O Modelo Linear de Mistura Espectral permitiu separar os diferentes modos de colheitas da cultura, identificando 435.414 ha de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, 95.128 ha de cana-de-açúcar com o uso do fogo e 306.898 ha de cana-de-açúcar que não foram colhidas. A erradicação das queimadas em canaviais é inevitável, tendo em vista todos os problemas socioambientais envolvidos no cultivo, portanto, uma das principais medidas para concretização é a forte atuação pública governamental tanto na fiscalização quanto no auxílio aos produtores, no que tange a aquisição de maquinários para colheita, como isenção ou redução da alíquota de ICMS (Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços).

Com as imagens SRTM, foi possível obter as classes de declividade das áreas de cana-de-açúcar, que empregaram o uso do fogo em declividade abaixo de 12% e superiores a 12%. O resultado obtido foi que 88.414 ha estavam em áreas abaixo de 12%, áreas propícias à mecanização; e 6.714 ha em áreas acima de 12%, cujo relevo dificulta a utilização do maquinário.

A queima prévia da cana-de-açúcar visa facilitar a colheita manual e reduzir custos na produção. Dentre as dificuldades para eliminação total da prática estão as dificuldades financeiras que o setor enfrenta, além da complexidade da introdução de maquinários em áreas com declividade acima de 12%, que apresenta falta de estabilidade com o risco de tombamento e a eliminação de empregos de baixa escolaridade.

Com a utilização do mapeamento de uso e cobertura da terra do IBGE (2000), foi observado que 53% das áreas em 2017 ocupadas por cana-de-açúcar eram, em 2000, ocupadas pelas áreas agrícolas, 21,7% eram pastagens, e os outros 25,3% demais classes.

O Brasil, como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, necessita melhorar o monitoramento e a fiscalização do setor sucroenergético, visando conciliar a sustentabilidade socioambiental como o cultivo, tendo em vista que os impactos provocados pelo cultivo tendem a acarretar graves entraves com o mercado internacional.

## 6. REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M.P. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4 2012, 574-585. <https://doi.org/10.3390/su4040574>

AGUIAR, D. A. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, p.440-451, 2009.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000300011>

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F. Monitoramento do modo da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo - Brasil por meio de imagens de sensores orbitais em dois anos-safra. **Revista SELPER**, v. 30, p. 34-43, 2010.

AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T.; SILVA, W.F.; ADAMI, M; MELLO, M.P. Remote Sensing Images in Support of Environmental Protocol: Monitoring the Sugarcane Harvest in São Paulo State, Brazil, **Remote Sensing**, v.3, n.12, p. 2682-2703, 2011. <https://doi.org/10.3390/rs3122682>

ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.3, 2013.

AMARAL, F. C. S.; SANTOS, H. G.; ÁGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N; PEREIRA, N. R.; OLIVEIRA, R. P.; CARVALHO JÚNIOR, W. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 95 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 63). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/89242/1/bpd63-2004-mapeamento-mg.pdf>>. Acesso em: 13 mai. 2017.

ANDRADE, J. M. F; DINIZ, K. M. **Impactos ambientais da agroindústria da cana-de-açúcar: subsídios para a gestão**. Monografia de especialização em Gestão Ambiental. Esalq-USP: Piracicaba, 2007.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Mapeamento do cultivo da cana-de-açúcar por meio da classificação de séries temporais de dados MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., João Pessoa. **Anais...** p. 3237-3244, 2015.

ARANHA, C., YAHN, C. A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 1, p. 3-18.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. *Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.58, n.10, p. 12-23, 2000.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS (BDMG). **Minas Gerais do Século XXI**. Belo Horizonte: Rona Editora, 2002. Disponível em: <<http://intranet.uemg.br/comunicacao/arquivos/MG-XXI-Volume%20I.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

BANCO INTERNACIONAL PARA RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO (BANCO MUNDIAL). Estudo de baixo carbono para o Brasil. Relatório de Síntese Técnica. Uso da Terra, Mudanças do uso da Terra e Florestas. 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/UsoTerra\\_Final\\_Portugue.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/UsoTerra_Final_Portugue.pdf)>. Acesso em: 14 dez. 2018.

BONINI, M. M.; ROSA, R. F. Planejamento Agrícola. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; FERNANDES, C. **Expansão e renovação de canavial**. Piracicaba/SP: Editora CP 2, 2007, 352 p.

BONSUCRO. **PADRÃO DE PRODUÇÃO BONSUCRO** incluindo o Padrão de Produção Bonsucro UE. v. 4, p.1-59, 2015.

BORGES, S. Brasil está no radar da Europa para a produção de beterraba açucareira. 2017. **Revista Cultivar**. Disponível em: <<https://www.grupocultivar.com.br/noticias/brasil-esta-no-radar-da-europa-para-a-producao-de-beterraba-acucareira>>. Acesso em: 22 set. 2018.

BRASIL. Agência Minas Gerais. **Brasil deve produzir mais álcool em 2016**. Disponível em: <<http://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/estado-deve-produzir-mais-alcool-em-2016>>. 27 out. 2016.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, Amsterdam, v.20, n.3, p.395-403, May-Jun. 1996. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. de; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.297-304, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300011>

CANAOLINE. **Cana-bisada pode carrear maiores quantidades de impurezas vegetais e minerais**. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/cana-bisada-pode-acarretar-mais-impurezas-vegetais-e-minerais.html#.XCPKYlxKjIU>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

CANASAT. **Mapeamento de cana via satélites de observação da Terra**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

CARVALHO, O. A., JÚNIOR; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; TRANCOSO GOMES, R. A.; DE SOUZA MARTINS, É.; SILVA, N. C. *Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil*. **Remote Sensing**, v.6, p. 330-351, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6010330>

CASTRO, S. S.; ABDALA, K.; SILVA, A. A.; BÔRGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-190, 2010.



CHERUBIN, M. R. *Soil quality response to land-use change for sugarcane expansion in Brazil*. Piracicaba, 2016. Tese (Doutorado em Nutrição de solos e plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

CHERUBIN, N. Colhedoras de cana ultrapassando as declividades. **Revista RPA News: cana & indústria**. 2018. Disponível em: <<https://revistarpanews.com.br/ed/51-edicao2015/edicao-167/694-colhedorased167>>. Acesso em: 8 de out. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira, Safra 2016/17**. Primeiro Levantamento. Brasília, v. 3, n.1, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira, Safra 2018/19**. Primeiro Levantamento. Brasília, v. 5, n.3, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira, Safra 2018/19**. Primeiro Levantamento. Brasília, v. 5, n.1, 2018.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Boletim Ativos da Cana-de-Açúcar**. Edição 15. Julho 2017. Disponível em: <<http://www.cnabrazil.org.br/boletins/ativos-cana-de-acucar-custo-de-producao-de-cana-de-acucar-na-regiao-centro-sul-safra-201617>>. Acesso em: 10 set. 2017.

CONGALTON, R. G., AND GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. New York: CRC Press, 2 Ed. 210p. 1957.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação normativa COPAM nº 133, de 15 de abril de 2009. **Regulamenta a prática da queima de cana-de-açúcar para fins de colheita, e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=32595>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

COSTA, G. H. G.; MASSON, I. S.; ROVIERO, J. P.; MUTTON, M. J. R. Reflexos do processamento de cana-de-açúcar bisada na qualidade do açúcar VHP. **Boletim CEPPA**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 281-288, jul./dez. 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/133650/ISSN1983-9774-2014-32-02-281-288.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 16 dez. 2018.

CRISTÓBAL, J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PRAKASH, A.; MATTAR, C.; SKOKOVIĆ, D.; SOBRINO, J. A. *An Improved Single-Channel Method to Retrieve Land Surface Temperature from the Landsat-8 Thermal Band*. **Remote Sensing**. v.10, p. 2-14, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10030431>

DATTA, P.S.; SCHACK-KIRCHNER, H. *Erosion Relevant Topographical Parameters Derived from Different DEMs—A Comparative Study from the Indian Lesser Himalayas*. **Remote Sensing**, v.2, p.1941-1961, 2010. <https://doi.org/10.3390/rs2081941>

DEBASTIANI, A. B., SOUZA, M.; MARCIELLI, AP. B.S.; SILVA, R. DAL'AGNOL; GUILHERME MOACIR SCHWADE.; LELIS, L.; BOTELHO, M. F. Árvore de decisão aplicada na identificação de áreas de risco de deslocamento: comparação dos métodos J48, Árvores Funcionais e Árvore Aleatória. VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. p. 01. 2013 Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/291341155\\_Arvore\\_de\\_decisao\\_aplicada\\_na\\_identificacao\\_de\\_areas\\_de\\_risco\\_de\\_deslizamento\\_comparacao\\_dos\\_metodos\\_J48\\_Functional\\_Trees\\_e\\_Random\\_Tree](https://www.researchgate.net/publication/291341155_Arvore_de_decisao_aplicada_na_identificacao_de_areas_de_risco_de_deslizamento_comparacao_dos_metodos_J48_Functional_Trees_e_Random_Tree)>. Acesso em 23 jun. 2018.



DIAS, B. A. S. Cumprimento da legislação ambiental da cana-de-açúcar e seus efeitos à saúde humana: uma análise da microrregião de Uberaba-MG, Brasil. In: Geopontal: Um resgate da Geografia do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. 9.; 2017, Ituiutaba, MG. **Anais...Ituiutaba-MG: Universidade Federal de Uberlândia**, 2017. p.511-521.

DIAS, B. A. S.; SCHULTZ, B.; SANCHES, I. D.; EBERHARDT, I. D.; ROSENDO, J. S. Identificação do modo de colheita da cana-de-açúcar em imagens multitemporais Landsat-like. RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 70, p. 527 - 554, 2018. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n2-45381>

DIAS, F. L. F.; MAZZA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação ao clima e solos do noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n.3, p. 627-634, 1999.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300016>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...Rio de Janeiro**, 1979. 83p.

ESALQ/USP. **Censo realizado pelo IAC identifica variedades de cana predominantes na região Centro-Sul do Brasil**. 2016. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/cprural/noticias/mostra/4127/censo-realizado-pelo-iac-identifica-variedades-de-cana-predominantes-na-regiao-centro-sul-do-brasil.html>. Acesso em: 14 ma. 2018.

EUROPEAN SPACE AGENCY'S (ESA). Informações sobre o PROBA-V. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-3rd-party-missions/proba-v/products-and-algorithms/products-information>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos\\_sm.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **A framework for land evaluation**. Rome. FAO. 1976. (Soils Bulletin, 32)

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000. 105p.

FREITAS, A. E. S. Software livre e código aberto. **Researchgate**. p.40-48. 2006. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/274375291\\_SOFTWARE\\_LIVRE\\_E\\_CODIGO\\_ABERTO](https://www.researchgate.net/publication/274375291_SOFTWARE_LIVRE_E_CODIGO_ABERTO)>. Acesso em: 06 jun. 2018.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). *Crop-water relations*. New York: **Wiley-Interscience**, p. 445-479,1983.

GBEP. Global Bioenergy Partnership. **Indicators for bioenergy**. 1º st Ed. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) Climate, Energy and Tenure Division. 2011)

GUIMARÃES, D. P.; REIS, R. J. dos.; LANDAU, E. C. **Índices Pluviométricos em Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010 - ISSN 1679-0154. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, do IBGE. Disponível em:

<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/879085/1/Bol30.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2018. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/DRB/Divisao%20regional\\_v01.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/DRB/Divisao%20regional_v01.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisas agropecuárias**. Departamento de Agropecuária. – 2. ed. – Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 92p. – ISSN 0101-2843; v. 6. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Producao\\_da\\_Extracao\\_Vegetal\\_e\\_da\\_Silvicultura\\_\[anual\]/Metodologia\\_da\\_Pesquisa/PesquisasAgropecuarias.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_da_Extracao_Vegetal_e_da_Silvicultura_[anual]/Metodologia_da_Pesquisa/PesquisasAgropecuarias.pdf)>. acesso em: 4 out. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Dados sobre pastagens no Brasil, ano base 2006. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/854>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF/MG. **Panorama da Biodiversidade de Minas Gerais**. 2012. Disponível em: < <http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/planobiodiversidade/rascunho%20panorama%201%20atualizacao.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

JENDIROBA, E. A expansão da cana-de-açúcar e as questões ambientais. In: SEGATO et al., (Org). **Expansão e renovação de canavial**. Piracicaba, 2007. p.37-52.

JIANG, W.; HE, G.; LONG, T.; NI, Y.; LIU, H.; PENG, Y.; LV, K.; WANG, G. *Multilayer Perceptron Neural Network for Surface Water Extraction in Landsat 8 OLI Satellite Images*. **Remote Sensing**. v.10, p. 2-22, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10050755>

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.2, p.155-159, 1970. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. de. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Revista Espaço e Geografia**, v.6, p. 91-121, 2003.

Laboratório de Visão Computacional (LVC). **InterIMAGE 1.30 - Manual do Usuário**. Disponível em: <<http://www.lvc.ele.puc-rio.br/projects/interimage/pt-br/documentacao/arquivos/InterImage%201.30%20-%20Manual%20do%20Usu%C3%A1rio.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

MACHADO, F. B. P. **Brasil, a doce terra – História do setor**. 2003. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia\\_da\\_cana\\_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf)>. Acesso em: 12 mai. 2018.

MARGARIDO, F. B.; SANTOS, F. Planejamento da lavoura. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa., 2013. 257p.

MASSON, T.; DUMONT, M.; MURA, M.D.; SIRGUEY, P.; GASCOIN, S.; DEDIEU, J.-P.; CHANUSSOT, J. *An Assessment of Existing Methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data*. **Remote Sensing**. v. 10, p.2-20, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10040619>

MARINHO, E.V.A.; KIRCHOFF, V.W.J.H. Projeto Fogo: um experimento para avaliar efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na baixa atmosfera. **Rev. Bras. Geofísica**, vol 9 (2): 107-119, 1991.

MATSUOKA, J. V.; HAERTEL, V. Investigação do processo de segmentação multiresolução utilizando o critério de ponderação de formas e cores aplicadas às imagens de áreas urbanas de alta resolução espacial do satélite Ikonos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais... XIII São José dos Campos: INPE**, 2007, p. 589-596. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.11.19/doc/589-596.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

MENDONÇA, J. C.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SOUSA, E. F.; MUNIZ, R. A.; ESTEVES, B. S. Mapeamento das áreas de cana-de-açúcar na região norte-fluminense - RJ por uso de técnicas de sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**. [online]. 2011, vol.31, n.3, pp.561-571. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v31n3/a16v31n3.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. 2013. Disponível em:<[http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventario\\_Ar/2014-05-27%20inventrio%202013.pdf](http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventario_Ar/2014-05-27%20inventrio%202013.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2017.

MIRANDA, E. E. Questões ambientais (impactos locais e globais) e energéticas: a expansão da cana-de-açúcar e a ocupação das terras no estado de São Paulo. In: CORTEZ, L. A. B. 1ª Ed. **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010, cap. 6, p.41-51.

MELLO, M. P.; RUDORFF, B. F. T.; VIEIRA, C. A. O.; AGUIAR, D. A. Classificação automática da colheita da cana-de-açúcar utilizando Modelo Linear de Mistura Espectral. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 12, n. 62, p. 181-188, 2010.

MORAES, M. A. F. D. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. **Economia Aplicada**., São Paulo, v. 11, n. 4, p. 605-619, out-dez. 2007.

MOREIRA, A.A.N; CAMELIER, C. Relevo e Vegetação. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geografia do Brasil - **Região Sudeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. v. 5, Cap. 2, p. 721.

MULIANGA, B.; BÉGUÉ, A.; CLOUVEL, P.; TODOROFF, P. *Mapping Cropping Practices of a Sugarcane-Based Cropping System in Kenya Using Remote Sensing*. **Remote Sensing**., v.7, p.14428-14444, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs71114428>

NAKABASSHI, L.; BOARETTO, G.; VERAS, L. Boletim Setor Sucroalcooleiro. **CEPER**. Ano V. jun/2017. Disponível em: <[https://www.fundace.org.br/\\_up\\_ceper\\_boletim/ceper\\_201706\\_00297.pdf](https://www.fundace.org.br/_up_ceper_boletim/ceper_201706_00297.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2018.

NASSAR, A. M. et al. *Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes*. In: ZUURBIER, P. e VOOREN, J. V. (Org.). ***Sugarcane Ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment***. Laxenburg: WAGENIGUEN Academic Publishers, 2008. p. 63-94.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Especificações MODIS**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em 28 mai. 2018.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ; 1989, 421 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81099.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

OLIVEIRA, L.; BARROCAS, R. Vantagens e desvantagens na queimada da cana, no estado de São Paulo, Brasil. (2001). In: VIII EGAL (Encontro de Geógrafos da América Latina). **Anais...** Disponível em: <<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal8/Geografiasocioeconomica/Geografiaagricola/04.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

OLIVEIRA, A. M. P. F.; BIGATON, A.; SILVA, H. J. T. da; GÓIA, H. R.; VIAN, C. E. F. Certificação no setor sucroenergético: Uma análise de indicadores e inserção da ISO 9001 e Bonsucro. **Revista iPecege**, v. 2, n. 2, p. 103, 2016.

OMWOMA, S.; AROWO, M.; LALAH, Joseph O.; SCHRAMM, Karl-Werner. ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SUGARCANE PRODUCTION, PROCESSING AND MANAGEMENT: A CHEMISTS PERSPECTIVE. *Environmental Research Journal*. 2014, Vol. 8 Issue 3, p195-223. 29p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e desenvolvimento Rio-92**. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/rio92.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2018.

PARENTE, L.; FERREIRA, L. *Assessing the Spatial and Occupation Dynamics of the Brazilian Pasturelands Based on the Automated Classification of MODIS Images from 2000 to 2016*. **Remote Sensing**. v.10, p.2-14, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10040606>

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia** [online]. 2009, vol.68, n.3, pp.789-795. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000300028>

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PROBIO. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite**: acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA: monitoramento do bioma Caatinga 2008-2009. Brasília, DF: 2011.

PROBIO. **Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado (Relatório Final)**. Brasília, DF, 2007.

PROBIO. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite**: acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA: monitoramento do bioma Mata Atlântica 2008-2009. Brasília, DF, 2012.

QGIS User Guide. **Qgis Versão 2.18**. 473p. Disponível em: <https://docs.qgis.org/2.18/pdf/en/QGIS-2.18-UserGuide-en.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2018.

RANGEL, R. R. **Global projection of Rangel-Um sistema de projeção do globo terrestre sobre um elipsóide**. Tese de Doutorado (Computação Aplicada)- INPE. São José dos Campos, p. 221. 2003. Disponível em: <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/03.08.16.55/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2018.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SUCROENERGÉTICO (RIDESA). **Melhoramento genético da cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.ridesa.com.br/universidades>. Acesso em: 17 mai. 2018.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; LEÃO, R. A. O.; MOREIRA, L. C. J.; GALVÃO, L. S. *Hyperspectral Remote Sensing for Detecting Soil Salinization Using ProSpecTIR-VS Aerial Imagery and Sensor Simulation*. **Remote Sensing**, v.9, p.2-16, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9010042>

RODRIGUES, E. B.; SAAB, O. J. G. A. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Bandeirantes - PR. **Semina: Ciências Agrárias**, v.28, p.581-588, 2007. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2007v28n4p581>

RONQUIM, C. C. Queimada na colheita de cana de açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. Campinas/SP: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2010.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, Uberlândia: EDUFU, 2009.

ROSSETTO, R. Agência de informação EMBRAPA. **Cana-de-açúcar: Corte**. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01\\_98\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_98_22122006154841.html) Acesso em: 20 dez. 2018.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; XAVIER, A. C.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano safra 2003/2004. **Agricultura em São Paulo**. v. 52, n.1, p.21-29, 2005.

RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M. Mapeamento da cana-de-açúcar na Região Centro-Sul via imagens de satélite. **Informe Agropecuário** (Belo Horizonte), v. 28, p. 79-86, 2007.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura**. Capítulo 9. INPE. São José dos Campos, 2002. Disponível em: [http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.14/doc/CAP9\\_MAMoreira.pdf](http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.14/doc/CAP9_MAMoreira.pdf) >. Acesso em: 27 out. 2016.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A. DE; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, MAURÍCIO A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, 9 abr. 2010. <https://doi.org/10.3390/rs2041057>

SÁ JÚNIOR, A. de. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.



SANCHES, I. D.; EPIHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 83-96, 2005.

SANCHES, I. Del' ARCO.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011, Curitiba. **Anais...** XV São José dos Campos: INPE, 2011, p. 7564-7571. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/mapastore/download/PDF10.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

SANTIGO, A. D; ROSSETTO, R. **Árvore do Conhecimento- Cana-de-açúcar- Programas**. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_141\\_22122006154842.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_141_22122006154842.html)>. Acesso em: 22 mai. 2018.

SANTOS, H. F. dos. EXPANSÃO DO AGRONEGÓCIO CANAVIEIRO E IMPLICAÇÕES SOCIOAMBIENTAIS NO MUNICÍPIO DE UBERABA (MG). **Revista Pegada**, v. 18, n. 2, p.112-146, 2017.

SANTOS, F.; BOREM, A. **Cana-de-açúcar – Do Plantio à Colheita**. 1.ed. Viçosa: UFV. 2013. 257p.

SCHOGOR, A. L. B.; NUSSIO, L. G.; MOURÃO, G. B.; SARTURI, J. O.; MATOS, B. C. Perdas das frações de cana-de-açúcar submetida a diversos métodos de colheita. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n.8, p.1443-1450, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000800007>

SCHULTZ, B. **Análise de imagens orientada a objetos e amostragem estatística no monitoramento de cana-de-açúcar, milho e soja no estado de São Paulo**. 2016. 243 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SCHULTZ, B.; FORMAGGIO, A. R.; EBERHARDT, I. D. R.; SANCHES, I. D.; OLIVEIRA, J. C.; LUIZ, A. J. B. Classificação orientada a objeto em imagens multitemporais Landsat aplicada na identificação de cana-de-açúcar e soja. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.68, p.131-143,2016.

SCHULTZ, B.; IMMITZER, M.; FORMAGGIO, A.R.; SANCHES, I.D.A.; LUIZ, A.J.B.; ATZBERGER, C. *Self-Guided Segmentation and Classification of Multi-Temporal Landsat 8 Images for Crop Type Mapping in Southeastern Brazil*. **Remote Sensing.**, v. 7, n. 11, p.14482-14508, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs71114482>

SEAPA. **Secretaria da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais**. Disponível em: <[http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq\\_Relatorios/Agricultura/2017/Jun/perfil\\_cana\\_jun\\_2017.pdf](http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Agricultura/2017/Jun/perfil_cana_jun_2017.pdf)>. Acesso em 27 mar. 2018.

SHIMABUKURO, Y. E. PONZONI, F. J. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 127 p.

SIAMIG. **Sindicato da Indústria de Fabricação do Alcool no Estado de Minas Gerais**. Perfil da Produção-Safra 2016/2017. 2018. Disponível em:

<<http://www.siamig.com.br/uploads/f07e32c432440d9a39b8a846514ebd1d.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

SIAMIG. **Capital do Zebu agora é capital da cana.** Disponível em: <[http://www.siamig.com.br/materia\\_20-06.pdf](http://www.siamig.com.br/materia_20-06.pdf)>. Acesso em: 27 out. 2016.

SIDRA/IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Produção Agrícola Municipal.2016.** Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>>. Acesso em: 07 nov. 2017.

SILVA, J. P. N.; SILVA, M. R. N. **Noções da cana-de-açúcar.** Inhumas: IFG- Instituto Federal de Educação e Tecnologia de Goiás; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 105 p. Disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico\\_acucar\\_alcool/nocoas\\_cultura\\_cana\\_acucar.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifgo/tecnico_acucar_alcool/nocoas_cultura_cana_acucar.pdf)>. Acesso em: 6 mar. 2018.

SOTHE, C.; ALMEIDA, C.M.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M.B. *Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil. Remote Sensing.*, v.9, p.2-22, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9080838>

STAUT, L. A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar.** 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_2/CanaSolo/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm)>. Acesso em: 11 abr. 2018.

THOMAS, A. L. **Cana-de-açúcar.** 2016. 22 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/147567/000998097.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 mai. 2018.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). **A história da cana-de-açúcar-da antiguidade aos dias atuais.** Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>>. Acesso em: 12 set. 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Relatório final da safra 2016/2017-Região Centro-Sul. 2017.** Disponível em: <[http://www.unicadata.com.br/download\\_media.php?idM=10993968](http://www.unicadata.com.br/download_media.php?idM=10993968)>. Acesso em: 23 mai. 2018. Acesso em: 24 mai. 2018.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Fotografia do setor sucroenergético no brasil e os benefícios economicos, ambientais e sociais gerados.** 2018. Disponível em: <[www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35831777](http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35831777)>. Acesso em: 13 jun. 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Using the USGS Landsat 8 Product.* 2015. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso: 12 abr. 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global.** 2015. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Interferometry and SRTM - An Overview.* 2015. Disponível em: <[https://lta.cr.usgs.gov/srtm/interferometry\\_overview](https://lta.cr.usgs.gov/srtm/interferometry_overview)>. Acesso em: 30 abr. 2018.

VALERIANO, M. M. Reflectância espectral de culturas agrícolas anuais (i): espectralradiometria. **Espaço e Geografia**, v. 6, n. 1, p. 1–21, 2003.

VAN DER WERFF, H.; VAN DER MEER, F. *Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Provide Data Continuity for Geological Remote Sensing*. **Remote Sensing**. v.8, p. 2-16, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8110883>

VIEIRA, M. G.; ROSENDO, J. S. Mapeamento das mudanças de uso da terra para cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba-MG (2011). **Ambiência Guarapuava (PR)** v.11 n.3 p. 563 - 585 Set./Dez. 2015.

VITTI, A. C. Eficiência da adubação da cana-de-açúcar relacionada aos ambientes de produção e as épocas de colheitas. **Pesquisa & Tecnologia**. vol. 10. n. 2. 2013.

WOLTERS, E.; DIERCKX, W.; IORDACHE, MARIAN-DANIEL.; SWINNEN, E. **PROBA-V Products User Manual**. v.3, n.1, 2018. disponível em: <[http://proba-v.vgt.vito.be/sites/proba-v.vgt.vito.be/files/products\\_user\\_manual.pdf](http://proba-v.vgt.vito.be/sites/proba-v.vgt.vito.be/files/products_user_manual.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2018.

YANG, G.; WENG, Q.; PU, R.; GAO, F.; SUN, C.; LI, H.; ZHAO, C. *Evaluation of ASTER-Like Daily Land Surface Temperature by Fusing ASTER and MODIS Data during the HiWATER-MUSOEXE*. **Remote Sensing**. v. 8, p.2-25, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8010075>

ZHOU, Z.; HUANG, J.; WANG, J.; ZHANG, K.; KUANG, Z.; ZHONG, S.; SONG, X. Object-oriented classification of sugarcane using time-series middle-resolution remote sensing data based on adaboost. **PLOS ONE**, vol. 10, n. 11, p. 1-16, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142069>