

ÂNGELO BAPTISTA ALFACE

**DINÂMICA ESPACIAL-TEMPORAL DE DADOS METEOROLÓGICOS E DA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS
PARA UM PERÍMETRO IRRIGADO DE MOÇAMBIQUE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A385d
2018

Alface, Ângelo Baptista, 1988-
Dinâmica espacial-temporal de dados meteorológicos e da
cultura de cana-de-açúcar utilizando geotecnologias para um
perímetro irrigado de Moçambique / Angelo Baptista Alface. –
Viçosa, MG, 2018.
xi, 44f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Silvío Bueno Pereira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.38-42.

1. Irrigação agrícola - Moçambique. 2. Sensoriamento
remoto. 3. Evapotranspiração. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.5879679

ÂNGELO BAPTISTA ALFACE

**DINÂMICA ESPACIAL-TEMPORAL DE DADOS METEOROLÓGICOS E DA
CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS
PARA UM PERÍMETRO IRRIGADO DE MOÇAMBIQUE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 02 de fevereiro de 2018.


Flávio Aparecido Gonçalves


Fernando França da Cunha
(Coorientador)


Silvio Bueno Pereira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre manteve me firme e forte durante muito tempo longe de casa e que me fez conhecer pessoas especiais que jamais pensei em conhecê-las, além de sabedoria para contornar todas as dificuldades.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela concessão de vaga e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia (DEA), pelo acolhimento e por todo conhecimento transmitido.

À Universidade Zambeze, meu local de trabalho, pela autorização de continuação de estudos.

Ao Borlaug Higher Education for Agricultural Research and Development (BHEARD) na pessoa da coordenadora do programa Dra. Celia Dinis, pela concessão da Bolsa de Mestrado.

Aos Professores Silvio Bueno Pereira e Fernando França da Cunha pela orientação e orientação na elaboração e conclusão desta dissertação.

Ao doutorando Roberto Filgueiras que desde o primeiro momento da concepção do projeto sempre se dispôs em ajudar.

A minha família, Helena Armando (companheira), Helton (Filho), Shonil (Filha), Elisabete Fernando (Mãe), Fernando, Beatriz (Irmãos). Enfim a todos que ajudaram, aconselharam me fortaleceram, mostrando o caminho correto para se tornar uma pessoa de bem de modo que se fosse descrever toda minha gratidão pela minha família a pesquisa ficaria em segundo plano. Infelizmente algumas pessoas muito especiais para mim não estarão presentes para verem meu sucesso de ter conseguido terminar uma fase do longo percurso profissional, demonstrando o grande sucesso em suas maneiras de educar ao meu pai Baptista Alfaca e irmã Inês, mas sei que eles de algum lugar, estão muito orgulhosos e felizes.

Aos colegas e aos amigos, especialmente os companheiros do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial do Centro de Referência em Recursos Hídricos (CRRH) pelo companheirismo e pelo apoio em todas as etapas vividas durante a realização deste estudo.

Aos amigos moçambicanos em Viçosa (Manuel Antônio Dina Talacuece, Osvaldo Sande, Sérgio Come, José Dique Lampião, Manuel Jorge) entre outros.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique, delegação da Beira pela disponibilização dos dados meteorológicos. À empresa açucareira de Mafambisse pelo uso das imagens dos pivôs.

OBRIGADO PELA FORÇA.

BIOGRAFIA

ÂNGELO BAPTISTA ALFACE, filho de Baptista Alface e Elisabete Fernando, nasceu em 07 de abril de 1988, na cidade de Chimoio, Província de Manica, Moçambique. Em dezembro de 2005, concluiu o ensino médio pela Escola Secundária Samora Moisés Machel em Chimoio, Manica, Moçambique. Em março de 2006, iniciou o curso de graduação em Engenharia Agrícola no Instituto Superior Politécnico de Manica (ISPM), localizado em Manica, em Moçambique, tendo concluído o mesmo em 2009. Em fevereiro de 2012, ingressou no quadro de Docente efetivo na Universidade Zambeze, em Moçambique. Em fevereiro de 2016, ingressou no Programa de Pós-graduação, nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais. Submeteu a defesa de dissertação em 02 de fevereiro de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 A cultura da cana-de-açúcar	3
2.2 Produção da cana-de-açúcar em Moçambique	3
2.3 Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da cultura de cana-de-açúcar....	4
2.3.1 Comportamento espectral de culturas agrícolas	5
2.4 Índice de vegetação	6
2.4.1 Relação entre kc e NDVI	7
2.5 Satélite Sentinel-2A	7
2.6 Satélite TERRA	8
2.7 Geoprocessamento e Sistema de Informação Geográfica	9
2.8 Evapotranspiração (ET).....	10
2.8.1 Evapotranspiração potencial (ETP) ou de referência (ETo)	10
2.8.2 Evapotranspiração de cultura (ETc)	10
2.8.3 Coeficiente de cultura (kc).....	11
2.8.4 Métodos analíticos para a estimativa da evapotranspiração de referência	11
2.9 Geoestatística	13
2.9.1 Semivariogramas	13
2.9.2 Krigagem.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Descrição da área de estudo	17
3.2 Fluxograma de etapas realizadas	18
3.3 Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir das imagens NDVI sob pivô central em Mafambisse.....	19
3.3.1 Aquisição de imagens do satélite Sentinel-2A	19
3.3.2 Cálculo de NDVI	19
3.3.3 Relação entre kc e NDVI	20
3.4 Variabilidade temporal dos elementos climáticos do Distrito de Nhamatanda	21
3.5 Distribuição espaço temporal da ET _o máxima do Distrito de Nhamatanda pelo MOD16.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24

4.1	Monitoramento espaço temporal da cana-de-açúcar a partir de NDVI sob pivô central em Mafambisse	24
4.1.1	Relação entre kc e NDVI.	29
4.2	Variabilidade temporal dos elementos climáticos no Distrito de Nhamatanda	31
4.3	Distribuição espaço temporal da ETo máxima do Distrito de Nhamatanda pelo MOD16.	35
5	CONCLUSÃO	37
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
7	ANEXO.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do tile h (v) de 1200 X 1200 km. _____	9
Figura 2: Esquema básico de uma função semivariograma. _____	14
Figura 3: Localização geográfica da área de estudo em Moçambique (Distrito de Nhamatanda/Sofala). _____	17
Figura 4: Fluxograma de detalhamento das etapas realizadas. _____	18
Figura 5: Resultados de NDVI dos cinco pivôs centrais analisados, sendo: pivô-1 (5A), pivô-2 (5B), pivô-3 (5C), pivô-4 (5D) e pivô-5 (5E). _____	24
Figura 6: Imagem temporal de NDVI do pivô-1. _____	25
Figura 7: Imagem temporal de NDVI do pivô-2. _____	26
Figura 8: Imagem temporal de NDVI do pivô-3. _____	26
Figura 9: Imagem temporal de NDVI do pivô-4. _____	27
Figura 10: Imagem temporal de NDVI do pivô-5. _____	28
Figura 11: Relação linear de regressão entre o k_{C-FAO} e k_{C-NDVI} médio. _____	29
Figura 12: Perfis temporais de NDVI, k_{C-FAO} e k_{C-NDVI} . _____	30
Figura 13: Semivariogramas das variáveis climáticas precipitação (A), umidade relativa do ar (B), temperatura do ar (C) ET_0-HS (D) e ET_0-CA (E). _____	33
Figura 14: Mapas temáticos de distribuição temporal das variáveis precipitação (A), umidade relativa do ar (B), temperatura média do ar (C), ET_0-HS (D) e ET_0-CA (E). _____	34
Figura 15: Distribuição espaço- temporal da ET_0 máxima pelo MOD16. _____	36
Figura 16: Gráfico de distribuição de frequência relativa das variáveis _____	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de satélite Sentinel-2A _____	8
Tabela 2: Valores de NDVI médio, kc-FAO e kc-NDVI médio referentes ao período analisado _____	30
Tabela 3: Estatística descritiva das variáveis climáticas, considerando o período de 1985 a 2014 _____	32
Tabela 4: Modelo e parâmetros do semivariograma das variáveis climáticas estudadas _	32
Tabela 5: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes _____	44
Tabela 6: Estatística de regressão entre kc-FAO e P2-kcNDVI médio _____	44
Tabela 7: Estatística de regressão entre kc-FAO e P1-kcNDVI médio _____	44
Tabela 8: Coeficiente de Person _____	44

LISTA DE ABREVIATURAS

ET ₀	Evapotranspiração de referência
ET _c	Evapotranspiração da cultura
Co	Efeito pepita
Ao	Alcance
Co _{+c}	Patamar
Cs	Coefficiente de assimetria
Ck	Coefficiente de curtose
MINAG	Ministério de Agricultura de Moçambique
TIA	Trabalho de inquérito Agrícola
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
CO ₂	Dióxido de carbono
CEPAGRI	Centro de Promoção de Agrícola-Moçambique
V	Vermelho
IVP	Infravermelho próximo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
EVI	Índice de vegetação realçado
LAI	Índice de Área Foliar
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
USGS	United States of Geological Survey
DOS	Dark Object Substraction
MRT	Modis reprojection Tool
WGS	World Geodetic System
SDAE	Serviços distritais de atividades econômicas
IDT	Índice dependência temporal
ESA	European Spacial Agency
HDF	Hierarchical Data Format
MRT	Modis Reprojection Tools
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
UTM	Universal Transversa de Mercator
CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção de Moçambique
CV	Coefficiente de variação
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
ITEM	Irrigação e Tecnologia Moderna
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique
MAE	Ministério de Administração Estatal de Moçambique
GMES	Global Monitoring for Environment and Security

RESUMO

ALFACE, Ângelo Baptista, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Dinâmica espacial-temporal de dados meteorológicos e da cultura da cana-de-açúcar utilizando geotecnologias para um perímetro irrigado de Moçambique.** Orientador: Silvio Bueno Pereira. Coorientador: Fernando França da Cunha.

A caracterização da variabilidade espacial e temporal de elementos climáticos, o mapeamento da evapotranspiração de referência máxima e o uso de imagens de satélites como complemento na gestão de irrigação constituem uma base primordial no processo de tomada de decisão para agricultura irrigada. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica espacial e temporal dos elementos climáticos e da cultura da cana-de-açúcar utilizando geotecnologias para subsidiar o planejamento agrícola do perímetro irrigado da companhia açucareira de Mafambisse, em Moçambique. Para condução da pesquisa foi utilizada uma série de imagens Sentinel-2A, referente ao período de outubro de 2016 a outubro de 2017. Por meio das imagens geradas NDVI foi possível fazer o acompanhamento da cana-de-açúcar em campo, se mostrando sensível às variações do vigor vegetativo da cana-de-açúcar. Foi observado um padrão semelhante entre os perfis de k_c -FAO e as curvas de NDVI, possibilitando o ajuste do k_c -NDVI médio, ressaltando forte evidência que o NDVI seja uma alternativa para obtenção do coeficiente de cultura (k_c). Constatou-se, por meio da análise da variabilidade temporal dos elementos climáticos, com uso krigagem ordinária, forte dependência temporal. O produto MOD16, apesar de não ter sido feito o ajuste para o cálculo da evapotranspiração de referência máxima, apresenta-se como uma ferramenta importante no dimensionamento de projetos de irrigação.

ABSTRACT

ALFACE, Ângelo Baptista, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Spatial-temporal dynamics of meteorological and sugarcane data using geotechnologies for an irrigated perimeter of Mozambique.** Adviser: Sílvio Bueno Pereira. Co-adviser: Fernando França da Cunha.

The characterization of the spatial and temporal variability of climatic elements, the mapping of maximum reference evapotranspiration and the use of satellite images as a complement in irrigation management constitute a fundamental basis in the decision-making process for irrigated agriculture. In this context, the objective of this research was to study the spatial and temporal dynamics of the climatic elements and the sugarcane crop using geotechnologies to subsidize the agricultural planning of the irrigated perimeter of the Mafambisse sugar cane company in Mozambique. To conduct the research, a series of Sentinel-2A images were used, covering the period from October 2016 to October 2017. By means of the NDVI generated images it was possible to follow the sugar cane in the field, being sensitive to the variations of the vegetative vigor of the sugar cane. A similar pattern was observed between the k_c -FAO profiles and the NDVI curves, allowing the adjustment of k_c -NDVI, emphasizing strong evidence that NDVI is an alternative to obtain the culture coefficient (k_c). It was verified, through the analysis of the temporal variability of the climatic elements, with ordinary kriging use, strong temporal dependence. The product MOD16, although the adjustment for the calculation of maximum reference evapotranspiration was not made, is an important tool in the design of irrigation projects.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada tem sido uma importante estratégia para otimização da produção de alimentos (FERREIRA et al., 2017). No entanto, a disponibilidade de recursos hídricos tem se tornado cada vez mais limitante nas diversas regiões do mundo, sendo necessário um gerenciamento eficiente para evitar impactos ambientais e conflitos pelo uso da água pelos diversos setores da sociedade (BERNARDO et al., 2006; SOUZA et al. 2014).

A redução do desperdício de água na agricultura passa pelo correto dimensionamento de projetos e manejo de irrigação. Esse dimensionamento depende, entre outros aspectos, do conhecimento da evapotranspiração da cultura (ET_c), por representar a quantidade de água a ser reposta ao solo e garantir o crescimento e a produção em condições ideais (MOURA et al., 2013). De igual modo, o correto conhecimento da evapotranspiração das culturas, seja para projeto e/ou manejo de irrigação, assume fundamental importância. Uma das alternativas para se racionalizar o uso da água em projetos agrícolas é estimar a ET_c a partir da evapotranspiração de referência (ET₀) e do coeficiente de cultura (k_c) (CARVALHO et al., 2011).

Segundo Papadavid e Hadjimitsis (2012) a estimativa da evapotranspiração é obtida em superfície por instrumentos instalados em estações meteorológicas, acarretando custos elevados e não representam espacialmente a variabilidade desses processos. A possibilidade de se obter informações detalhadas da evapotranspiração ao longo de extensas áreas agrícolas por sensoriamento remoto é entendida como alternativa de baixo custo e de rapidez na obtenção de resultados (FLORENZANO, 2011; ANJOS et al., 2016; FILGUEIRAS et al., 2016).

Moreira (2017) relata que o uso de imagens de satélites é visto como um recurso complementar na gestão de irrigação. Dessa forma, pode-se utilizar das informações geradas por meio das imagens NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). O NDVI trata-se de um índice de vegetação que permite estimar o vigor vegetativo dos campos de produção, possibilitando o acompanhamento do desenvolvimento e uniformidade das plantas. Importante ressaltar que as imagens NDVI auxiliam na verificação de áreas com menor uniformidade de irrigação, indicando a necessidade de ajuste dos equipamentos, além de ser uma importante ferramenta no diagnóstico de desempenho de operação de sistemas de irrigação.

O comportamento dos elementos climáticos de uma determinada região também é considerado como uma estratégia fundamental no processo de planejamento e manejo de irrigação (FILGUEIRAS et al., 2016). Uma forma de melhorar a compreensão dos elementos climáticos é representá-los espacial e temporalmente por meio das análises geoestatísticas, que se baseiam na teoria das variáveis regionalizadas, em que medidas mais próximas tendem a ser

mais parecidas do que os valores observados em locais mais distantes. Tais técnicas fornecem métodos para quantificar a auto-correlação e incorporá-la na estimação de valores em locais não observados (VIEIRA, 2000; SARTORI et al., 2010).

Carvalho et al. (2012) afirmam que a obtenção da correta distribuição espacial dos elementos climáticos é primordial no planejamento agrícola, principalmente com referência a instalação de culturas anuais, bem como quando o excesso ou a falta de água pode prejudicar ou inviabilizar a produção agrícola.

Moçambique, país onde se concentra a pesquisa deste trabalho, apresenta enormes potencialidades agrícolas, com 13 bacias hidrográficas principais e um potencial de 36 milhões de hectares de terras agricultáveis, sendo o potencial para a implementação da agricultura irrigável de 3 milhões de hectares (MINAG/TIA, 2014).

O distrito de Nhamatanda, local específico da pesquisa, é atravessado pela bacia hidrográfica do rio Púngoè no corredor da Beira. A sua localização geoestratégica faz com que o mesmo tenha mais investimento agrícola, tanto do setor público como do privado. Ressalta-se, ainda, que a empresa açucareira de Mafambisse está localizada no mesmo Distrito. A empresa possui 2.626 ha de produção de cana-de-açúcar irrigados por 41 pivôs centrais.

Para o contexto de Moçambique o uso de imagens de satélite para o monitoramento das culturas, a caracterização da variabilidade espacial e/ou temporal de elementos climáticos e o mapeamento da evapotranspiração em extensas áreas constitui informações fundamentais no processo de tomada de decisão para a agricultura irrigada. Dessa forma, no presente trabalho, teve-se como objetivo geral estudar a dinâmica espacial e temporal dos elementos climáticos e da cultura da cana-de-açúcar com uso de geotecnologias para subsidiar o planejamento agrícola do perímetro irrigado da companhia açucareira de Mafambisse, distrito de Nhamatanda, em Moçambique.

Os objetivos específicos do trabalho foram: (i) monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir das imagens NDVI sob pivô central em Mafambisse e estabelecer sua relação com o coeficiente da cultura (k_c); (ii) estudar a variabilidade temporal de elementos climáticos baseada na estatística descritiva; (iii) analisar a variabilidade temporal de elementos climáticos utilizando o método da krigagem ordinária; (iv) representar a distribuição espaço-temporal da evapotranspiração de referência (ET_0) máxima, por meio do produto MOD16, para o dimensionamento de projetos de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

Silva et al. (2012) caracterizam a cana-de-açúcar como uma cultura semiperene, que perfilha de maneira abundante na fase inicial do desenvolvimento, permitindo cerca de cinco cortes para posteriormente ser feita a reforma do canavial. Até a primeira colheita, de cana-planta, apresenta um período de crescimento entre 12 meses (cana de ano) e 18 meses (cana de ano-e-meio), dependendo da época de plantio e da variedade. Segundo Fernandes (2009) após a primeira colheita passa a ser denominada de cana soca, seguida pela ressoca, segunda ressoca e assim sucessivamente, tendo cada uma dessas fases um período de crescimento de, aproximadamente, 12 meses (cana de ano).

A cana soca e/ou cana de ano é plantada entre setembro a outubro, com máximo desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo com as condições climáticas adversas do período de inverno, podendo ser colhida a partir de julho (SILVA et al., 2012).

O ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar é influenciado por algumas exigências climáticas, principalmente, boa luminosidade, calor e água, variando a quantidade conforme a fase de desenvolvimento.

Rodrigues (1995) afirma que com elevadas taxas de radiação solar os colmos são mais grossos e mais curtos, as folhas mais longas e mais verdes e o perfilhamento mais intenso. O fotoperíodo afeta o comprimento do colmo, assim, entre 10 e 14 horas o colmo aumenta, sofrendo redução entre 16 e 18 horas. Além disso, o número de folhas é reduzido em condições de déficit hídrico ou de baixas temperaturas.

A temperatura do ar afeta o crescimento da cana-de-açúcar quando ultrapassa 20°C, ocorrendo um aumento na taxa de crescimento da cultura, visto que a faixa de 25°C a 33°C é a mais favorável ao desenvolvimento vegetativo (MENEGUETTI et al., 2010).

2.2 Produção da cana-de-açúcar em Moçambique

A cana-de-açúcar foi introduzida comercialmente em Moçambique no século XIX. Inicialmente, era cultivada nos vales dos rios Zambeze e Búzi, devido os solos, o clima e a qualidade da água serem ideais para o bom cultivo da cana nessas regiões. A expansão da indústria açucareira em Moçambique para outras regiões do país foi iniciada pelos

investimentos Britânicos. O investimento Português na indústria açucareira veio mais tarde, nos anos 1950 (MANUSSE, 2012).

A primeira fábrica de açúcar em Moçambique foi montada em 1908, no Distrito de Búzi, no vale do rio Búzi (Companhia do Búzi). Em 1914 foi construída uma pequena fábrica próxima ao rio Incomati. A Sena Sugar Estates foi completamente estabelecida na primeira década do século XX, com a fábrica de Marromeu, que veio a produzir em 1926. A produção também foi iniciada, mais ao menos no mesmo período, na fábrica de Luabo, situada a 20 km de distância do Distrito de Marromeu, onde a Sena Sugar Estates esteve situada. Atualmente, a empresa Tongaat Hulett é a empresa que possui fábricas em Xinavane, na província de Maputo, e Mafambisse, na província de Sofala, no sul e centro do País, respetivamente, com capacidade de 327 mil toneladas (CEPAGRI, 2013).

2.3 Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da cultura de cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar possui características favoráveis ao uso de sensoriamento remoto, por ocupar extensas áreas e apresentar um dossel uniforme. Alguns estudos demonstram diversas aplicações do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento dessa cultura (OLIVEIRA, 2014).

Florenzano (2011) define o sensoriamento remoto como uma tecnologia destinada à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles. A aquisição de dados em sistemas de sensoriamento remoto registra, em selecionadas faixas de comprimento de onda, a quantidade de energia refletida ou emitida por objetos na superfície terrestre. Novo (2010) define sensoriamento remoto como a utilização conjunta de sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados instalados a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, tendo por objetivo o estudo de eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra, por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas diversas manifestações.

Moreira (2007) define sistemas sensores como dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, gerando informações que possam ser transformadas em produtos passíveis de interpretação, seja na forma de imagem, gráficos ou qualquer outro tipo de produto. Quatro domínios de resolução caracterizam os sistemas sensores, sendo eles: espectral, espacial ou geométrica, temporal e radiométrica.

Algumas aplicações do sensoriamento remoto se resumem em mapeamento das áreas agrícolas, monitoramento de culturas agrícolas, estimativa de área de culturas, estimativa de produtividade, mapeamento de áreas de irrigação (pivô), fiscalização de crédito agrícola, detecção de estresse em plantas, previsão de safras e agricultura de precisão (SANCHES, 2016).

2.3.1 Comportamento espectral de culturas agrícolas

O comportamento espectral de um objeto pode ser definido como o conjunto de valores sucessivos da refletância ao longo do espectro eletromagnético. Os processos de emissão, absorção, reflexão e transmissão ocorrem simultaneamente e suas intensidades relativas caracterizam a matéria em investigação. Dependendo das características físicas e químicas dos objetos os quatro processos ocorrem com intensidades diferentes em diferentes regiões do espectro (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Ainda, segundo os autores, as regiões do espectro eletromagnético têm diferentes nomenclaturas, abrangendo desde os raios gama, passando pelos raios X, ultravioleta, luz visível e infravermelho, atingindo até ondas de rádio.

O comportamento espectral das diversas substâncias é denominado assinatura espectral, utilizado em Sensoriamento Remoto para distinguir diversos materiais entre si. Qualquer fonte de energia eletromagnética é caracterizada pelo seu espectro de emissão, o qual pode ser contínuo ou distribuído em faixas discretas. Cada objeto na superfície terrestre apresenta uma curva que indica a refletância espectral de cada um deles nas diferentes bandas espectrais que compõem os sensores remotos. Cada objeto reflete de forma distintas nas bandas do visível e do infravermelho.

Moreira (2012) ressalta que a fração da radiação eletromagnética refletida pelos alvos da superfície é muito importante para o sensoriamento remoto. O maior número de aplicações de imagens e dados de satélites ou de outras formas de coleta é feito através da coleta, processamento e análise da radiação refletida pelos alvos. Essa radiação refletida pode ser de origem solar ou ter sido emitida por sensores ativos. A refletividade de um alvo depende das propriedades elétricas e da textura do alvo.

Segundo Florenzano (2011) os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda de acordo com as suas características biofísicas e químicas.

Na região do visível a vegetação reflete mais energia na faixa correspondente ao verde, o que explica enxergar a vegetação na cor verde. Na faixa do infravermelho próximo a vegetação reflete muito mais energia destacando dos demais alvos.

2.4 Índice de vegetação

Os índices de vegetação podem ser definidos como transformações lineares de bandas espectrais nas bandas do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético, utilizadas para realçar o comportamento espectral da vegetação. Esses índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice da área foliar (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). Quando relacionados ao vigor vegetativo, atividade fotossintética e produtividade apresentam elevado grau de correlação (EIPHANIO et al., 1996).

Atualmente, um dos índices de vegetação comumente utilizado é o proposto por Rouse em 1974, denominado de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que é sensível a presença da clorofila e outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do infravermelho (RISSO et al., 2012).

O NDVI é muitas vezes utilizado para acompanhar a vegetação global, permitindo detectar as mudanças na fenologia e sazonalidade da vegetação, além de possibilitar a análise do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

O NDVI é sensível à presença de pigmentos que participam nos processos fotossintéticos (FORMAGGIO e SANCHES, 2017) e minimiza algumas fontes externas de ruído como, sombras de nuvens. Essas propriedades, tornaram-no, como um dos índices espectrais mais utilizados em estudos locais, regionais e globais (Wardlow e Egbert, 2008). No entanto, uma peculiaridade inerente ao NDVI é a saturação assintótica, o que o torna pouco sensível à detecção de variações de biomassa verde em condições de elevados índices de área foliar. Devido à grande utilidade deste índice, existem vários estudos de mapeamento, estimativa de produção e produtividade das culturas e monitoramento das culturas agrícolas em campo por meio de perfis temporais (FONTANA et al., 2000).

Risso et al. (2012), avaliando o desempenho dos índices de vegetação NDVI e EVI (índice de vegetação realçado), do sensor MODIS, na discriminação de áreas de soja, no Estado do Mato Grosso, concluíram que o NDVI apresentou melhor desempenho na discriminação das áreas de soja na entressafra, enquanto o EVI apresentou melhor desempenho no período de pleno desenvolvimento da cultura. Deste modo, os autores afirmaram que o melhor resultado para classificação, no Estado do Mato Grosso, por meio de séries temporais do sensor MODIS, foi obtido com uso combinado do NDVI na entressafra e do EVI no pleno desenvolvimento.

Ribeiro et al. (2017), estudando a variabilidade espaço-temporal da condição da vegetação na agricultura irrigada por meio de imagens, concluíram que o NDVI foi eficiente na diferenciação das distintas épocas de cultivo do milho, sendo os maiores valores obtidos nas datas de máximo desenvolvimento vegetativo e os menores nos estádios iniciais da planta e no período de senescência da cultura.

2.4.1 Relação entre kc e NDVI

Segundo Bezerra et al. (2010) a refletância espectral das culturas pode fornecer uma estimativa indireta do kc, uma vez que as curvas de kc são semelhantes às curvas de NDVI. Os campos agrícolas irrigados por pivô central possuem características que favorecem a determinação de kc, pois o crescimento uniforme das culturas dentro de uma área bem definida, como o pivô central, favorece as definições de kc e possibilitam o ajuste e a calibração dos valores obtidos pelos índices de vegetação com estádios de desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo. Neste sentido, uma relevante aplicação da análise dos índices de vegetação está relacionada à estimação do coeficiente de cultura (kc). Como a atribuição dos valores de kc está relacionada ao ciclo fenológico da cultura, existem estudos que sugerem que os perfis temporais de índices de vegetação podem ser utilizados na obtenção dos valores de kc (BARIANI, 2016; SINGH; IRMAK, 2009; KAMBLE et al. 2013).

2.5 Satélite Sentinel-2A

As imagens do satélite Sentinel-2A faz parte da missão imageadora Sentinel-2 multiespectral do Programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security) conjuntamente administrada pela Comunidade Europeia e a ESA, para observação da Terra, realizando coleta de dados sobre a vegetação, solos e humidade, rios e áreas costeiras e dados para correção atmosférica (absorção e distorção). O sensor MSI é caracterizado por uma resolução espacial de 10 metros e resolução temporal de 10 dias, com altitude média de 786 km e 290 km de faixa de imageamento (GONÇALVES, 2017), possuindo 13 bandas espectrais, conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características de satélite Sentinel-2A

Resolução	Número de bandas	Nome da banda	Comprimento de onda (nanômetro)
10 m	B02	Azul	490
	B03	Verde	560
	B04	Vermelho	665
	B08	Infravermelho próximo	842
20m	B05	Red Edge1	705
	B06	Red Edge2	740
	B07	Red Edge3	783
	B08A	Red Edge4	865
	B011	SWIR1	1610
	B012	SWIR2	2190
60m	B01	Aerossol	443
	B09	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

Fonte: Adaptado do ESA (2018).

2.6 Satélite TERRA

O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999 como parte do programa Earth Observing System (EOS). O sensor MODIS foi projetado para adquirir dados relativos à interação terra, oceano e atmosfera, possui 36 bandas com cobertura espectral de 0,4 – 14,4 μm e espacial de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1000 m (bandas 8 a 36), oferecendo cobertura global com tempo de revisita de 1 a 2 dias. Uma imagem representa no solo uma área de largura igual a 2.330 km (ANDERSON et al., 2003).

Aquisição das imagens é realizada gratuitamente pela Internet (USGS/LPDAAC), divididas em grades (*tile*) de 10 por 10 graus do equador, equivalente a 1.200 x 1.200 km, conforme ilustrado na Figura 1. O sistema de coordenadas da grade inicia em zero vírgula zero (0,0), representando o número da grade horizontal e o número da grade vertical, no canto superior esquerdo e prossegue à direita (horizontal) e para baixo (vertical). O sistema de coordenadas da grade finaliza em (35,17), localizada no canto inferior direito. A escolha do sensor MODIS é uma opção interessante para fins de estudo em aplicações nas culturas agrícolas, devido à aquisição gratuita das imagens, por apresentar imagens com uma ótima correção atmosférica, por apresentar imagens com um ótimo georeferenciamento e por apresentar produtos específicos e em grade, facilitando (sob o aspecto do tamanho do arquivo) a aquisição remota das imagens pela Internet. O MODIS disponibiliza um total de 44 produtos, todos disponíveis gratuitamente pela NASA no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção sinusoidal.

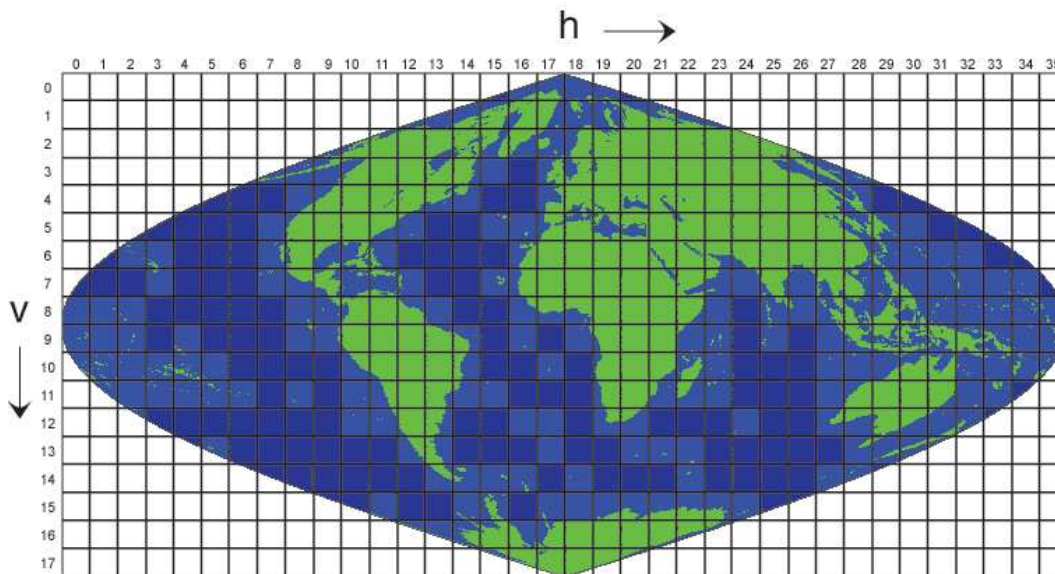


Figura 1: Representação do tile h (v) de 1200 X 1200 km.
 Fonte: United States Geological Survey (2013).

2.7 Geoprocessamento e Sistema de Informação Geográfica

Segundo Lisboa Filho e Iochpe (1996) o Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuário), perfeitamente integrados, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação.

Moreira (2012) define SIG como sendo softwares especializados para aquisição, edição, armazenamento, integração, análise e saída de dados espacialmente distribuídos.

Uma das vantagens dos SIGs é que eles podem manipular dados gráficos e não gráficos de forma integrada, provendo uma forma consistente para análise e consulta envolvendo dados geográficos. Pode-se permitir, por exemplo, acesso a registros de imóveis a partir de sua localização geográfica. Além disso, podem fazer conexões entre diferentes entidades, baseados no conceito de proximidade geográfica.

Os SIG constituem-se na integração de três aspectos distintos da tecnologia computacional sendo: sistemas de gerenciamento de banco de dados (dados gráficos e não gráficos); procedimentos para obtenção, manipulação, exibição e impressão de dados com representação gráfica; e algoritmos e técnicas para análise de dados espaciais (LISBOA FILHO; IOCHPE, 1996).

2.8 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas. Dependendo das condições da vegetação, do tamanho da área vegetada e do suprimento de água pelo solo define-se situações bem características, tais como, potencial, real, de oásis e de cultura. Essas condições são descritas a seguir.

2.8.1 Evapotranspiração de referência (ET₀)

É definida como sendo a evapotranspiração de uma extensa superfície vegetada com vegetação rasteira (normalmente gramado), em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15cm, sem restrição hídrica e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes. Nesse caso, a evapotranspiração depende apenas das variáveis meteorológicas, sendo, ET₀ uma variável meteorológica que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes (PEREIRA et al., 2013; PEREIRA et al., 2007).

2.8.2 Evapotranspiração de cultura (ET_c)

É a quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semeadura até a colheita, quando não houver restrição hídrica. A ET_c é função da área foliar (superfície transpirante), pois quanto maior a área foliar maior será a ET_c para a mesma demanda atmosférica. A ET_c é obtida pela Equação 1 (PEREIRA et al., 2007).

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (1)$$

em que, k_c é o coeficiente de cultura, que varia com as fases fenológicas e também entre espécies e variedades.

2.8.3 Coeficiente de cultura (kc)

É definido como a razão adimensional usada para relacionar a evapotranspiração da cultura (ET_c) com a evapotranspiração de referência (ET₀), num tempo específico (ALLEN, 1998).

$$k_c = \frac{ET_0}{ET_c} \quad (2)$$

Para fins de planejamento e manejo de irrigações, apenas a evapotranspiração de referência (ET₀) e da cultura (ET_c) são necessárias (PEREIRA et al., 2013). Segundo Alencar et al. (2015) os principais elementos climáticos que afetam a evapotranspiração são: radiação solar, umidade, temperatura do ar; déficit de pressão de vapor e velocidade do vento.

2.8.4 Métodos analíticos para a estimativa da evapotranspiração de referência

Existem métodos diretos e indiretos para a estimativa da evapotranspiração de referência, em que cada metodologia apresenta características próprias. Os métodos usados para este trabalho estão descritos na sequência.

2.8.4.1 Método de Hargreaves-Samani

Método empírico, desenvolvido para a região de clima seco. Baseia-se na temperatura média do ar e na amplitude térmica. Tem como vantagem a sua aplicabilidade em climas áridos e semiáridos. A desvantagem é sua limitação de uso para condições de clima úmido, quando apresenta superestimativas.

O cálculo da ET₀ pelo método de Hargreaves-Samani é obtido por meio da equação:

$$ET_0 = 0.0023 * Q * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * (17.8 + T_{med}) * NDP \quad (3)$$

em que:

ET₀ = evapotranspiração de referência (mm/mês);

Q = irradiância solar extraterrestre (MJ/m/dia);

T_{max} = temperatura máxima (°C);

T_{min} = temperatura mínima (°C);

Tmed = temperatura média (°C);

NDP = número de dias do mês.

2.8.4.2 Método de Camargo

Método empírico, baseado na metodologia de Thornthwaite, desenvolvida para condições de clima úmido. Tende a subestimativa da ET_0 em condições de clima seco, sendo obtida pela equação:

$$ET_0 = 0.01 * Q * Tmed * NDP \quad (4)$$

2.8.4.3 Estimativa da ET_0 por meio do algoritmo MOD16

O algoritmo MOD16 (MU et al., 2011) foi concebido para estimar a evapotranspiração global da superfície a partir de imagens do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Terra e Aqua) e dados meteorológicos provenientes do Global Modeling and Assimilation Office (GMAO).

O MOD16 é uma revisão do algoritmo, proposto por Cleugh et al. (2007), que adaptaram a equação de Penman-Monteith para uso com dados de sensoriamento remoto. Os dados de entrada no MODIS, requeridos para o algoritmo MOD16, possuem resolução espacial entre 500 m e 1 km; incluem os produtos globais de uso e cobertura da terra; índice de área foliar; radiação fotossinteticamente ativa e albedo.

Com relação aos parâmetros meteorológicos necessários para o algoritmo são utilizados dados de reanálise diários do GMAO referentes à radiação solar incidente, temperatura do ar e pressão de vapor da água, com resolução espacial de $1,00^\circ \times 1,25^\circ$ (ZHAO et al., 2005).

O produto de evapotranspiração global MOD16 pode ser usado para calcular o equilíbrio regional de água e energia e o estado da água do solo. Portanto, fornece informações importantes para o gerenciamento de recursos hídricos. Com os dados de ET a longo prazo os efeitos das mudanças no clima, no uso da terra e nos distúrbios dos ecossistemas (por exemplo, incêndios florestais e surtos de insetos) nos recursos regionais de água e na mudança de energia da superfície terrestre podem ser quantificados.

A evapotranspiração terrestre inclui a evaporação do solo úmido e da água da chuva interceptada pelo dossel antes de atingir o solo e a transpiração através dos estômatos nas folhas

e caules da planta. A evaporação da água interceptada pelo dossel é um fluxo de água muito importante para os ecossistemas com índice de área foliar (LAI) elevado.

A ET_0 por sensoriamento remoto é obtida indiretamente a partir de outros produtos de sensoriamento remoto, como NDVI e EVI. Sendo assim, essa estimativa está dependente da qualidade dos dados de entrada. Apesar de algumas incertezas quanto às classificações de uso e cobertura da terra, o algoritmo MOD16 apresenta um grande potencial no mapeamento e monitoramento da ET_0 em diversas escalas temporais (RUHOFF et al, 2011).

2.9 Geoestatística

A geoestatística surgiu para verificar e quantificar o grau de dependência temporal a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais (SILVA et al. 2010).

2.9.1 Semivariogramas

A estimativa da dependência espacial entre amostras vizinhas no espaço pode ser realizada por meio da autocorrelação, que é de grande utilidade quando se está fazendo amostragem em uma direção. Porém, quando a amostragem envolve duas direções (x, y), o instrumento mais indicado na estimativa da dependência espacial entre as amostras é o variograma, ou ainda, quando a interpolação entre locais medidos for necessária para a construção de mapas de isolinhas (SOARES, 2006).

Segundo Liu (2006) o semivariograma constitui uma ferramenta básica de krigagem que representa quantitativamente a regionalização de uma variável temporal. De acordo com Reichardt et al. (2012) o variograma é o gráfico que expressa a variação do atributo com a distância entre pontos no campo de amostragem (Figura 2).

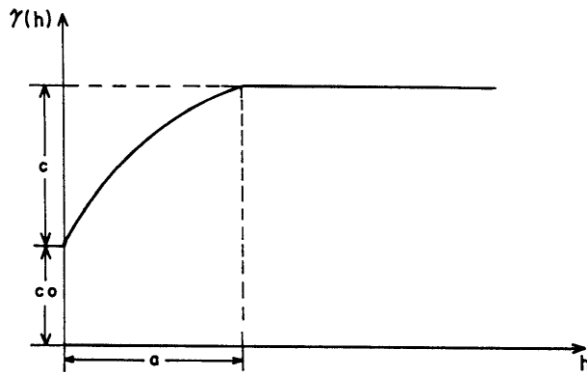


Figura 2: Esquema básico de uma função semivariograma.
Fonte: Soares (2006).

Estão representados na Figura 2 os seguintes parâmetros:

- Alcance (a): é distância dentro da qual as observações apresentam-se correlacionadas espacialmente ou temporalmente, ou seja, corresponde a zona de influência ou de dependência espacial ou temporal e separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes). Segundo Androitti (2005) seu valor reflete o grau de homogeneização entre as amostras. Quanto maior for o seu valor mais homogêneo será o fenômeno a ser estudado.
- Patamar (C_0+c): é o nível em que o variograma se estabiliza e considera-se que não haja mais dependência espacial entre os dados observados, porque a variância da diferença entre pares de observações torna-se invariante com a distância (SOARES, 2006).
- Efeito pepita (C_0): é referente ao ruído ou erro associado à pequena escala, isto é, a descontinuidade do semivariograma para distâncias inferiores à menor distância de interesse entre os dados amostrados; é uma incerteza do semivariograma para pequena escala (VIEIRA, 2000). Segundo Reichardt (2012) seu valor revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as observações.

Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de h , verifica-se o efeito pepita puro neste caso, em que há ausência total da dependência temporal (GUIMARÃES, 2004).

A condição para o ajuste de modelos a dados experimentais é aquela que represente a tendência de semivariograma em relação ao número de pares observados e que o modelo tenha positividade definida condicionalmente (SOARES, 2006).

De acordo com Batista (2012), apesar do comportamento assimétrico dos dados não constituir um fator limitante à análise geoestatística, o seu valor pode dificultar o ajuste de modelos de semivariogramas.

Diferentes modelos teóricos podem ser ajustados a um semivariograma experimental. Contudo, os modelos teóricos mais utilizados são os modelos esférico, exponencial, gaussiano e os lineares com e sem patamar (GUIMARÃES, 2004).

2.9.2 Krigagem

A krigagem é o método de interpolação da geoestatística que usa a dependência espacial expressa no variograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Liu (2006) definiu a krigagem como uma técnica de modelagem espacial desde a análise exploratória de dados, modelagem da estrutura de correlação espacial e interpolação estatística espacial. Androitti (2005) define a krigagem como técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores de variáveis para locais onde as mesmas não foram medidas a partir de valores adjacentes interdependentes.

Segundo Rossi et al. (1994) o que diferencia a krigagem dos outros interpoladores é a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância por meio do variograma. Enquanto que Carvalho et al. (2005) afirmam que os métodos de krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, ou seja, são estimadores ótimos e a correlação espacial entre observações vizinhas para prever valores em locais não-amostrados é o aspecto fundamental que diferencia os interpoladores geoestatísticos dos demais.

Pontos próximos da posição a ser interpolada levam maiores pesos que os mais distantes, e ainda, as distâncias consideradas não são somente entre o ponto a ser predito e os vizinhos, mas também entre os vizinhos (ANDROITTI, 2005). Com isso, pode se considerar que, para uma mesma distância, dados agrupados terão menores pesos quando comparados individualmente com pontos isolados, pois esses dados trazem informações quase redundantes de uma mesma região.

Segundo Soares (2006), para que o estimador seja ótimo, o mesmo não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima. Essas condições devem ser rigorosamente satisfeitas e, portanto, são usadas como ponto de partida para a dedução das equações. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas.

A krigagem simples, ordinária e universal são as diferentes formas mais usuais de krigagem linear, enquanto que, a não linear utiliza a transformação não linear dos dados, tais como lognormal, multigaussiana, indicativa, entre outras (YAMAMOTO et al., 2013). A krigagem pode ser afetada pela estrutura e variabilidade espacial ou temporal dos dados e pela escolha do modelo do variograma não só, como também, pelo número de vizinhos próximos usados para estimação (ZIMBACK, 2003).

Com a análise de mapas de contorno ou de superfície, gerados por meio da krigagem, pode-se tomar decisões importantes, por exemplo, em relação ao aumento da eficiência na utilização de fertilizantes com redução de custo e aumento de produtividade. Assim, tem sido desenvolvida várias pesquisas usando os diversos interpoladores.

Carvalho et al. (2012), estudando interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude, concluíram que estimativas ótimas de precipitação anual média foram obtidas por meio da cokrigagem ordinária, com menor número de estações pluviométricas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida a partir de dados obtidos na República de Moçambique, País localizado no Sudeste do Continente Africano (Figura 3A), na Costa Oriental da África Austral, georreferenciado entre os paralelos $10^{\circ} 27'$ e $26^{\circ} 52'$ de Latitude Sul e entre os meridianos $30^{\circ} 12'$ e $40^{\circ} 51'$ de Longitude Leste e WGS84. É limitado pela Tanzânia a norte, a oeste por Malawi, Zâmbia, Zimbabwe, África do Sul e Suazilândia. Possui 11 províncias com uma extensão de costa de 2.500 km, ocupando uma área de 799.380 km². Administrativamente, Moçambique está dividido em quatro níveis: província, distrito, posto administrativo e localidade.

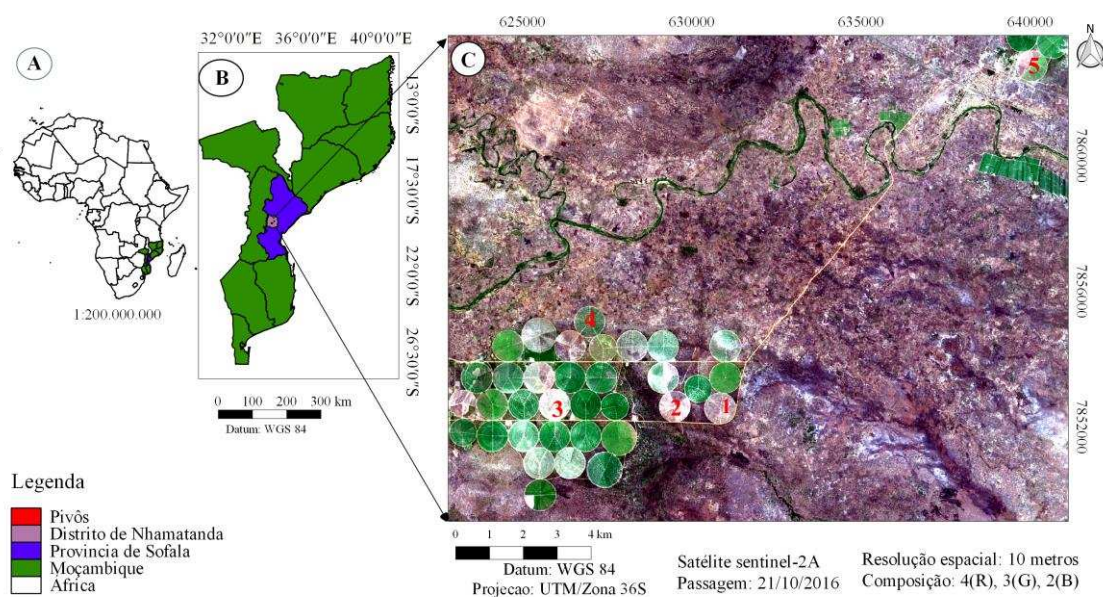


Figura 3: Localização geográfica da área de estudo em Moçambique (Distrito de Nhamatanda/Sofala).

A empresa açucareira de Mafambique possui campos de produção no Distrito de Nhamatanda, província de Sofala, em Moçambique (Figura 3B e C). O distrito situa-se entre as coordenadas $19^{\circ} 36' 57''$ S e $34^{\circ} 44' 19''$ L e altitude de 44 metros acima do nível do mar.

A precipitação anual média varia de 1.000 a 1.460 mm e a temperatura oscila entre 14°C (mínima) e 33°C (máxima), observadas em julho e janeiro/fevereiro, respectivamente, sendo a média anual de 27°C . Segundo a classificação climática de Köppen o clima do distrito está compreendido na zona de transição do clima tropical chuvoso para o de estepe com estação seca no inverno (MAE, 2005). Os solos das áreas irrigadas por pivôs-centrais na empresa

açucareira de Mafambisse são areno-argilosos. A área ocupada pela cultura da cana-de-açúcar corresponde ao uso de cinco clones (N14, N21, N25, N27 e N32), sendo N14 o mais usado.

3.2 Fluxograma de etapas realizadas

Para melhor compreensão das atividades realizadas nesta pesquisa, na Figura 4 é apresentado um fluxograma de procedimentos efetuados. Com a definição dos objetivos, foram elencados três principais objetivos específicos, sendo: o monitoramento da cultura por imagens; a variabilidade temporal de elementos climáticos; e a variabilidade espaço-temporal da ET_0 por MOD16. O detalhamento de cada etapa pode ser observado no fluxograma da Figura 4.

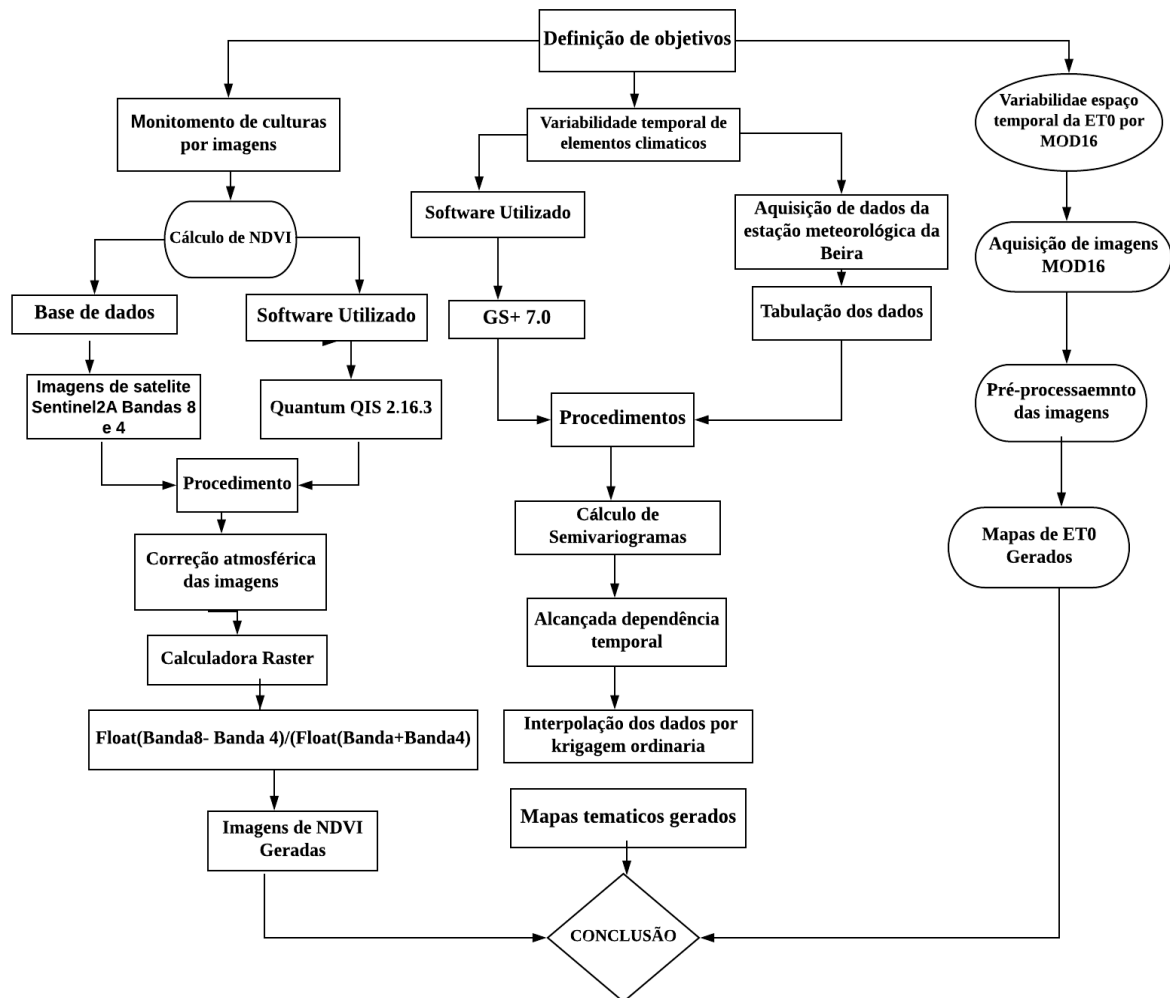


Figura 4: Fluxograma de detalhamento das etapas realizadas.

3.3 Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir das imagens NDVI sob pivô central em Mafambisse

3.3.1 Aquisição de imagens do satélite Sentinel-2A

Para o monitoramento dos pivôs-centrais da propriedade agrícola da empresa açucareira de Mafambisse fez-se uso do satélite Sentinel-2A. Foram adquiridas imagens gratuitas no *site* da Earth Explorer do USGS (*United States of Geological Survey*), nas bandas 8 e 4 que correspondem ao infravermelho próximo e vermelho, respectivamente, nas seguintes datas: 21/10/2016, 10/11/2016, 10/12/2016, 29/01/2017, 09/04/2017, 08/06/2017, 17/08/2017, 26/09/2017, 16/10/2017 e 26/10/2017.

Após a aquisição das imagens e com objetivo de minimizar o efeito atmosférico sobre os dados de refletância captados pelo sensor, fez-se a correção atmosférica pelo método DOS-1 (*Dark Object Subtraction*) a partir do complemento SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*), disponível no software QGIS 2.16.3 (CONGEDO, 2016). As imagens com nuvens foram descartadas, exceto a imagem do pivô-4, relativo à data 29/01/2017, com o objetivo de manter um padrão de datas com as imagens selecionadas dos demais pivôs. As imagens selecionadas e analisadas abrangeram diferentes etapas do ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

3.3.2 Cálculo de NDVI

Com o objetivo de monitorar a cultura em campo foi calculado o NDVI, a partir das imagens adquiridas. Foi utilizado, como ferramenta computacional, o programa QGIS 2.16.3 (QGIS Development Team, 2016).

Para o cálculo do NDVI foram selecionados cinco pivôs centrais da açucareira Mafambisse, representados na Figura 3, sendo o NDVI calculado por meio da Equação 5. Para melhor realce das imagens e distinguir os alvos com a visão natural, fez-se a composição com cores verdadeiras 4(R), 3(G) e 2(B).

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad (5)$$

em que:

NDVI = índice de vegetação da diferença normalizada;

IVP = refletância da banda do infravermelho próximo (Banda 8);

V = refletância na banda do vermelho (Banda 4).

Os valores obtidos pelo NDVI foram contidos em uma mesma escala de valores, no intervalo de -1 e 1. Quanto mais próximo do valor unitário positivo implica inferir em um maior vigor vegetativo; e quanto mais próximo do valor unitário negativo de presença de corpos de água, nuvens, entre outros (PONZONI et al., 2007).

3.3.3 Relação entre kc e NDVI

A obtenção do kc_{NDVI} foi feita por meio da correlação dos valores de kc_{FAO} e de NDVI para a cultura da cana-de-açúcar, considerando os dados do pivô-2. A estimativa do kc_{NDVI} foi realizada por meio do modelo de regressão linear simples (Equação 6) entre valores médios do NDVI, por terem apresentado maior R^2 em relação aos valores máximos, com valores de kc estimados pela FAO. A equação de regressão linear ajustada no pivô-2 foi usada para calcular os valores médios de kc_{NDVI} do pivô-1. Finalmente, a qualidade de ajuste das curvas de kc por meio da correlação entre os valores estimados e observados de kc, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) como índice relativo de desempenho do modelo, também foi aplicado o teste t para verificar se existe diferenças entre duas medias de dois grupos diferentes. Para avaliar a precisão da média populacional calculou-se o erro padrão.

$$y = ax + b \tag{6}$$

em que:

x variável independente neste caso o NDVI med.;

y variável dependente neste caso kc_{NDVI} ;

a e b coeficientes de regressão.

3.4 Variabilidade temporal dos elementos climáticos do Distrito de Nhamatanda

O cálculo da variabilidade temporal foi realizado com o objetivo de acompanhar o comportamento das variáveis climáticas ao nível do distrito de Nhamatanda. Foi usada uma série temporal de 30 anos (1985 a 2014) com dados mensais. Assim, a partir da estação meteorológica da cidade da Beira, localizada a 69 km do local onde se encontram os pivôs, foram adquiridos os dados de precipitação mensal média, temperatura do ar mínima e máxima e umidade relativa do ar. A estação utilizada está situada a uma altitude de 8 metros acima do nível do mar.

Tendo em vista que a geostatística tem maior enfoque na variação espacial, fez-se, no presente trabalho, um ajuste de modo que fosse possível ser aplicado para a análise temporal, conforme descrito na sequência.

Os semivariogramas foram calculados pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(t) = \left(\frac{1}{2N(t)} \right) \sum_{i=1}^{N(t)} [Z(x_i) - Z(x_i + t)]^2 \quad (7)$$

em que:

- $\hat{\gamma}(t)$ = valor de semivariograma estimadas para a distância t (meses);
- $Z(x_i)$ e $Z(x_i - t)$ = pares de observações separados pelo vetor t (meses);
- $N(t)$ = número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+t)$;
- t = vetor de separação dos pares.

A evapotranspiração de referência estimadas pelos métodos de Hargreaves- Samani e Camargo foi obtida por meio das equações 3 e 4, respectivamente.

Foi usado o programa GS+ 7.0 (ROBERTSON, 2008) para produzir os semivariogramas e o ajuste de modelos. Ressalta-se que esse programa faz a seleção do modelo teórico com base na menor soma do quadrado dos resíduos e no maior coeficiente de determinação (R^2).

Posterior ao ajuste dos semivariogramas e dos cálculos dos respectivos pesos associados, procedeu-se com a interpolação dos dados por meio da krigagem ordinária, conforme a equação:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (8)$$

em que:

- $\hat{Z}(x_0)$ = valor estimado para local x_0 não amostrado;

$\hat{z}(x_i)$ = valor obtido por amostragem no campo e
 λ_i = peso associado ao valor medido na posição x_i .

Para a verificação da dependência temporal foi usada a metodologia de Zimback (2001), expressa pela equação:

$$IDT = \frac{c_1}{C_0 + C_1} \times 100 \quad (9)$$

De acordo com Zimback (2001) a dependência temporal (IDT) é classificada como fraca para valores $\leq 25\%$; moderada entre 25% e 75%; e forte quando $\geq 75\%$.

3.5 Distribuição espaço temporal da ET₀ máxima do Distrito de Nhamatanda pelo MOD16.

O mapeamento da ET₀ máxima foi realizado utilizando produtos de MOD16, adquiridos no endereço eletrônico do *Numerical Terradynamic Simulation Group/The University of Montana* (<http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16>). Foram adquiridas 180 imagens a partir do tile H21V10, do produto de evapotranspiração potencial mensal para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2014, totalizando 15 anos. Os dados foram disponibilizados em formato de HDF (*Hierarchical Data Format*). Dessa forma, foi usado o software MRT (*Modis Reprojection Tools*) para converter para o formato Geotiff. Este *software* está disponível no endereço eletrônico: https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool. Posteriormente, as imagens foram convertidas da projeção Sinusoidal para a projeção de coordenadas geográficas WGS84. Para transformar os valores em mm mês⁻¹ foi necessário multiplicar as imagens por 0,1. Para a geração dos mapas foi usado o QGIS 2.16.3.

Após realizar os procedimentos descritos acima e obtidos os mapas mensais de evapotranspiração de referência, foi necessário aplicar nas equações uma operação lógica em toda a série temporal com o objetivo de selecionar os valores máximos de evapotranspiração de referência, pixel por pixel, por mês, em todos os anos avaliados. O procedimento ilustrado pela Equação 10 exemplifica apenas o mês de janeiro, tendo sido aplicado para os restantes meses.

$$ET_{0(\text{jan.max})} = \max. (ET_{0\text{jan}2000}, ET_{0\text{jan}2001}; ET_{0\text{jan}2002}, \dots, ET_{0\text{jan}2014}) \quad (10)$$

em que:

$ET_{0(\text{jan.max})}$ = evapotranspiração janeiro máxima.

$ET_{0\text{jan}2000}$ = evapotranspiração janeiro 2000.

$ET_{0\text{jan}2001}$ = evapotranspiração janeiro 2001.

$ET_{0\text{jan}2002}$ = evapotranspiração janeiro 2002.

$ET_{0\text{jan}2014}$ = evapotranspiração janeiro 2014.

Selecionados os maiores valores de evapotranspiração de todos os meses fez-se o recorte das imagens utilizando um arquivo vetorial do distrito de Nhamatanda. O dado vetorial foi gerado pelo Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção de Moçambique (CENACARTA), disponível gratuitamente no *website*: www.cenacarta.com e, finalmente, foram convertidas para a projeção de coordenadas planas WGS84/UTM Zona 36S.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir de NDVI sob pivô central em Mafambisse

Estão representados na Figura 5 os resultados de NDVI dos cinco pivôs centrais estudados. Todos pivôs apresentaram valores médios diferentes em todas datas analisadas representando, desta forma, o ciclo fenológico da cultura em campo. Os máximos valores de NDVI (0,8) foram registrados a partir do dia 29/01/2017, significando que, nesse período, a cana atingiu o maior estágio de desenvolvimento.

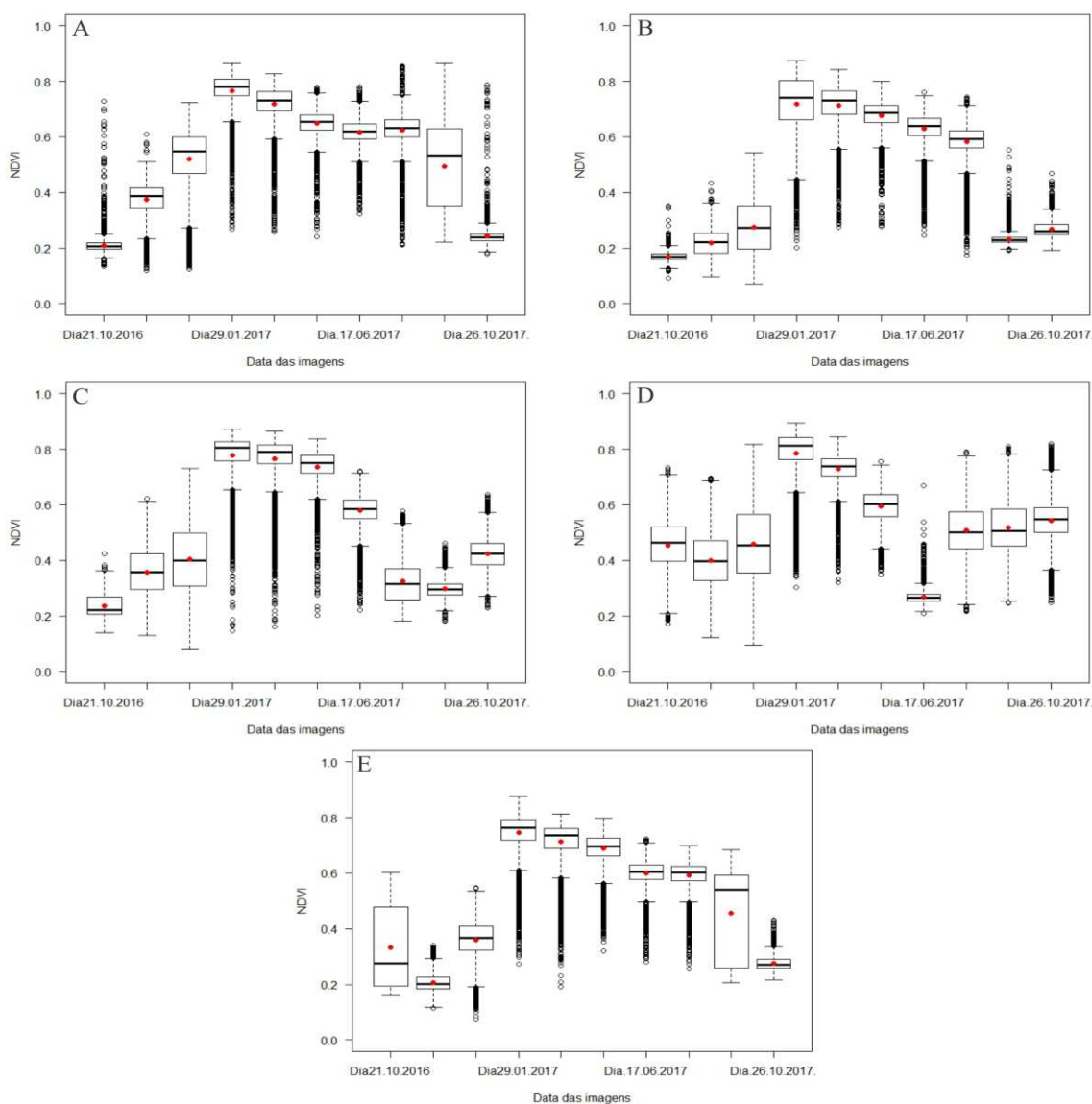


Figura 5: Resultados de NDVI dos cinco pivôs centrais analisados, sendo: pivô-1 (5A), pivô-2 (5B), pivô-3 (5C), pivô-4 (5D) e pivô-5 (5E).

Estão representadas nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 as imagens de NDVI dos pivôs avaliados. Os valores mais baixos de NDVI estão associados ao tom de vermelho, correspondente a solo exposto, enquanto os valores mais altos estão associados ao tom de verde, correspondendo ao bom vigor vegetativo da cultura.

No pivô-1 (Figura 6) o comportamento espectral do solo esteve dominante nas duas primeiras e última datas avaliadas. O maior vigor vegetativo foi registrado nas datas 29/01/2017 e 09/04/2017, correspondendo a maior atividade fotossintética, decrescendo a partir da data 08/06/2017 até 26/09/2017, correspondendo ao processo de maturação da cultura. A colheita começou a ser feita na data 16/10/2017.

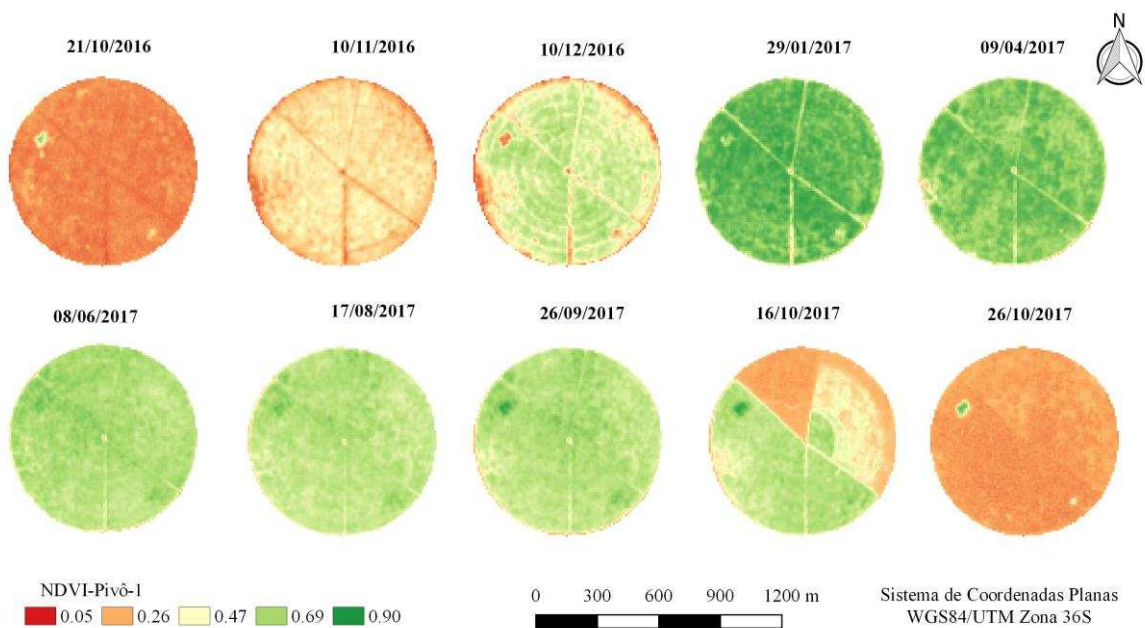


Figura 6: Imagem temporal de NDVI do pivô-1.

O mesmo comportamento foi observado no pivô-2 (Figura 7), ressaltando que o comportamento espectral esteve dominante nas três primeiras datas. Na data 16/10/2017 já não tinha cultura em campo, o que significa que já havia sido preparado o solo para nova safra.

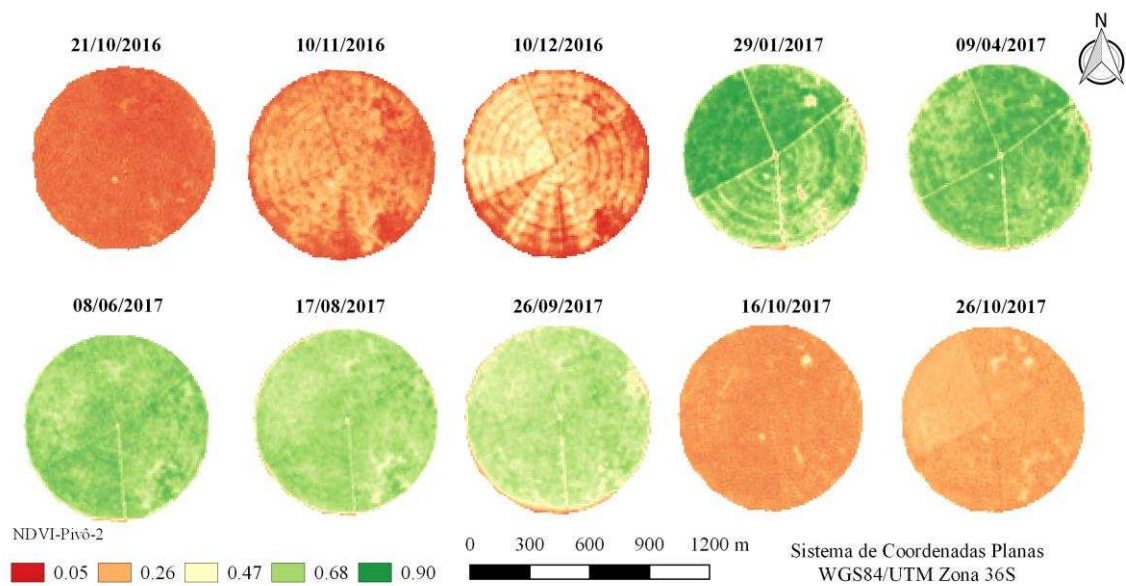


Figura 7: Imagem temporal de NDVI do pivô-2.

O pivô-3 (Figura 8) apresentou solo exposto na primeira data e o maior vigor nas datas 29/01/2017, 09/04/2017 e 08/06/2017. Na data 17/08/2017 o vigor começou a decrescer, dando início a colheita da cultura no mês seguinte. Na data 16/10/2017 o mesmo voltou a apresentar solo exposto e na data seguinte (26/10/2017) foi verificado alguma vegetação em campo, significando início de novo ciclo.

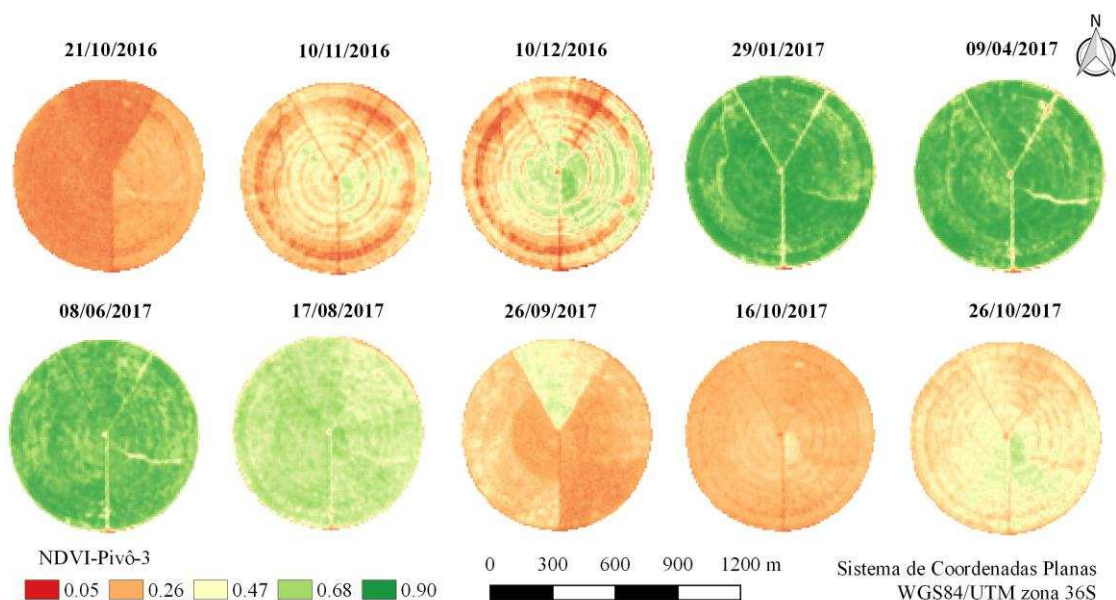


Figura 8: Imagem temporal de NDVI do pivô-3.

Sartori (2009) afirma que mesmo em condições de boa disponibilidade de água existem áreas com baixos valores de NDVI, onde aparece solo exposto. Esse fato foi observado no pivô-

3 nas datas 10/11/2016 e 10/12/2016, onde constatou-se anéis circundantes com tom de solo exposto. Este fato pode estar associado a existência de algum problema relacionado com os aspersores de distribuição de água nesse período, porém, o mesmo anel não foi observado com a mesma intensidade nas datas subsequentes. Portanto, pode-se afirmar que o problema tenha sido atenuado.

No pivô-4 (Figura 9), na primeira data avaliada, observa-se que já existe cultura em campo, apesar da constatação de algumas irregularidades da vegetação, sendo o maior vigor vegetativo verificado nas datas 29/01/2017 e 09/04/2017. Na data 17/08/2017 apresentou solo exposto e nas datas subsequentes começou a surgir alguma vegetação, representando o início do novo ciclo de produção.

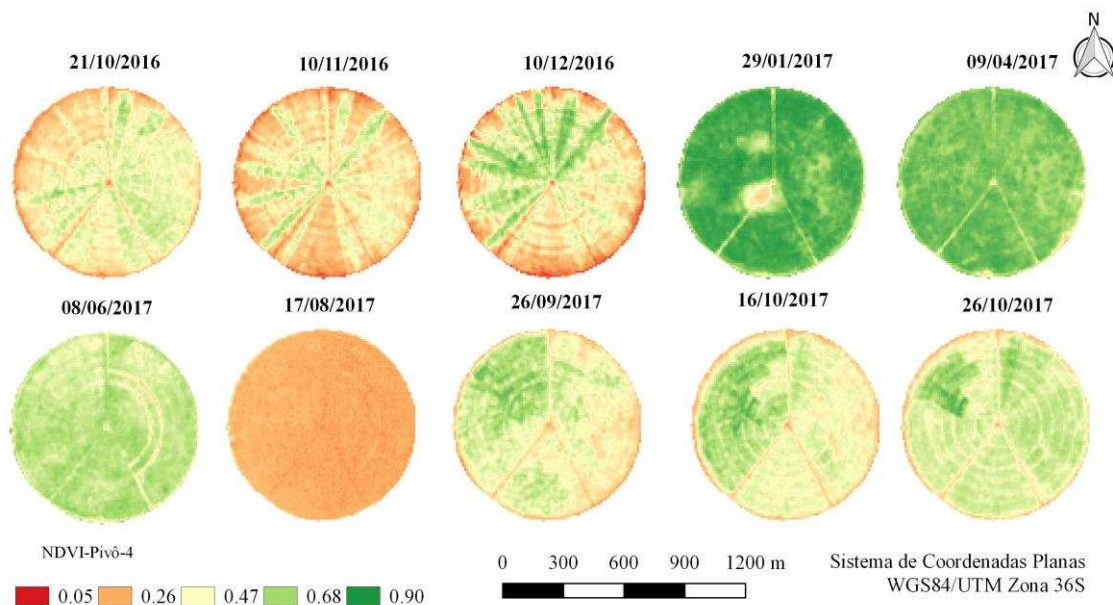


Figura 9: Imagem temporal de NDVI do pivô-4.

AGROSMART (2018) relata que o processamento digital de imagens de satélite permite que os produtores possam identificar anomalias na lavoura e tomar ações corretivas ao longo da safra, obtendo, assim, melhores resultados. Diante disso, este pivô apresentou, nas três primeiras datas, feixes verdes, que pode significar que tenha ocorrido problema no estabelecimento da cana-de-açúcar nesse período, aliados também ao problema de manejo de irrigação. Na data 08/06/2017 apresentou alguns anéis com tendência de solo exposto. É importante ressaltar que os padrões de variabilidade nesse pivô podem estar relacionados aos problemas de manejo da irrigação (problemas de aspersores) ou de estabelecimento da cultura, pois observa-se feixes nas três primeiras datas avaliadas.

No pivô-5 (Figura 10) foi verificado, no início da análise, dois tons na imagem, representando solo exposto (tom avermelhado) e cultura ainda em campo (tom esverdeado). Este fato representa que a cultura, em parte da área, foi totalmente colhida e somente na data seguinte foi observado o solo totalmente exposto. A partir da data 29/01/2017 até 08/06/2017 foi registrado o maior vigor vegetativo e nas duas datas subsequentes uma queda do valor. A colheita começou na data 16/10/2017 e na data seguinte apresentou o solo totalmente exposto. Este resultado corrobora com afirmação de Formaggio e Sanches (2017), ressaltando que em um solo recém-plantado o comportamento espectral é dominado pelo comportamento espectral de um solo exposto.

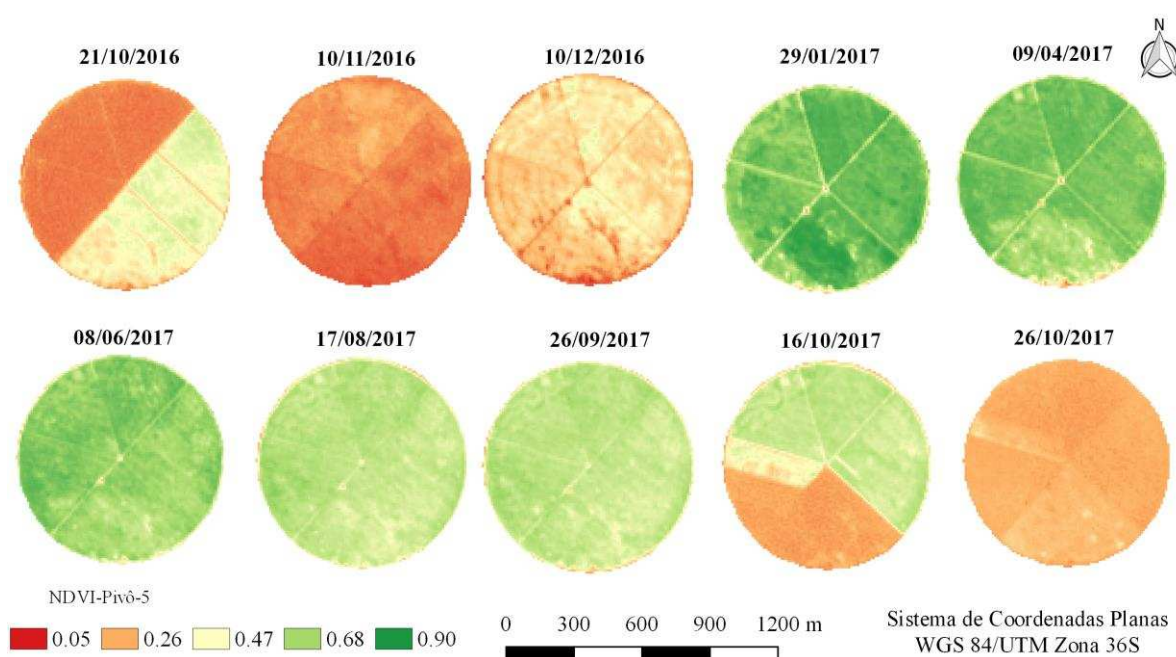


Figura 10: Imagem temporal de NDVI do pivô-5.

De maneira geral, o aumento no índice de vegetação significa ganho de biomassa. A partir da data 08/06/2017, nos pivôs-1 e 3, o valor de NDVI começou a decrescer, enquanto que, no pivô-2, o valor de NDVI começou a decrescer na data 17/08/2017. O decréscimo do valor de NDVI significa que a cultura inicia seu processo de maturação, em que ocorre o acúmulo de sacarose. Nessa etapa a cultura encontra-se no oitavo mês nos pivôs-1 e 3 e no décimo no pivô-2. Nessa fase ocorre, também, o valor máximo de área foliar, indicando um crescimento lento. Esses resultados corroboram com o trabalho de Lucas e Schuler (2007), que concluíram que o NDVI da cana-de-açúcar começa a diminuir a partir do sétimo mês do ciclo da cultura. A colheita começou no dia 16/10/2017 nos pivôs-1 e 2, enquanto que, no pivô-3, iniciou na data 26/10/2017.

4.1.1 Relação entre kc e NDVI.

A Figura 11 apresenta a equação ajustada por meio da relação entre NDVI médio e kc_{-FAO} . Observa-se, ainda, que 71% do valor de kc_{-NDVI} é explicado pela variação do NDVI médio, considerando os dados do pivô-2. Pelo *p-value* observa-se que o ajuste foi significativo ao nível de 5%. Singh e Irmak (2009) encontraram alta correlação entre os valores de kc_{-NDVI} e kc_{-FAO} quando estabeleceram a relação entre os valores de $NDVI_{max}$ e kc_{-FAO} para as culturas de milho e soja na região centro-sul do Estado de Nebraska. É importante ressaltar que a consideração dos valores médios de NDVI, nessa análise, implica na obtenção de um melhor ajuste dos dados.

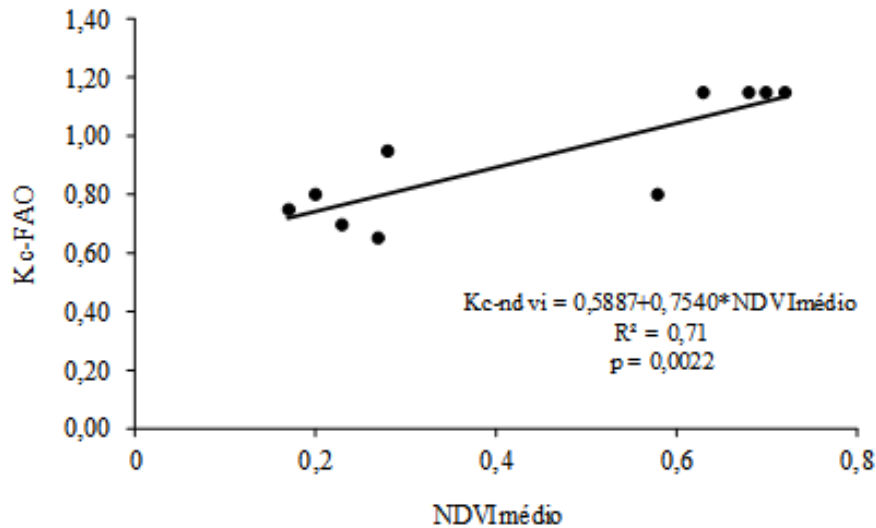


Figura 11: Relação linear de regressão entre o kc_{-FAO} e kc_{-NDVI} médio.

Na Tabela 2 estão apresentados valores de kc_{-NDVI} médio para o pivô 2 e 1. Os valores de kc_{-NDVI} médio do pivô-1 foram calculados a partir da equação ajustada da Figura 11. A aplicação do *t-test* (Tabela 5 em anexo), resultou no *p-value* de 0,9638 e 0,5833 o que permite inferir que não há diferenças significativas entre os valores de kc_{-NDVI} médio dos dois pivôs (2 e 1) com valores de kc_{-FAO} .

Tabela 2: Valores de NDVI médio, $kc_{\text{-FAO}}$ e $kc_{\text{-NDVI}}$ médio referentes ao período analisado

$kc_{\text{-FAO}}$	Pivô-2		Pivô-1	
	NDVImed	$Kc_{\text{-NDVI}}$ médio	NDVImed	$kc_{\text{-NDVI}}$ médio
0,75	0,17	0,72	0,20	0,74
0,80	0,20	0,74	0,34	0,85
0,95	0,28	0,80	0,5	0,97
1,15	0,72	1,13	0,71	1,12
1,15	0,7	1,12	0,66	1,09
1,15	0,68	1,10	0,61	1,05
1,15	0,63	1,06	0,59	1,03
0,80	0,58	1,03	0,57	1,02
0,70	0,23	0,76	0,61	1,05
0,65	0,27	0,79	0,24	0,77

Na comparação entre os perfis de $kc_{\text{-NDVI}}$ médio e $kc_{\text{-FAO}}$ (Figura 12) observa-se um comportamento das curvas semelhante, não obstante o $kc_{\text{-FAO}}$ ter apresentado um comportamento pouco superior em relação as outras curvas. A estatística aplicada a estes resultados (Tabelas 6, 7 e 8 em anexo) apresentou para o pivô-2 $R^2=0,73$; $r=0,86$; Erro padrão= $0,11$ e $p\text{-value}$ da regressão de $0,0016$, sendo considerada significativa. No pivô-1 os resultados foram semelhantes, sendo $R^2=0,50$; $r=0,71$; Erro padrão = $0,16$ e $p\text{-value}$ da regressão de $0,02$.

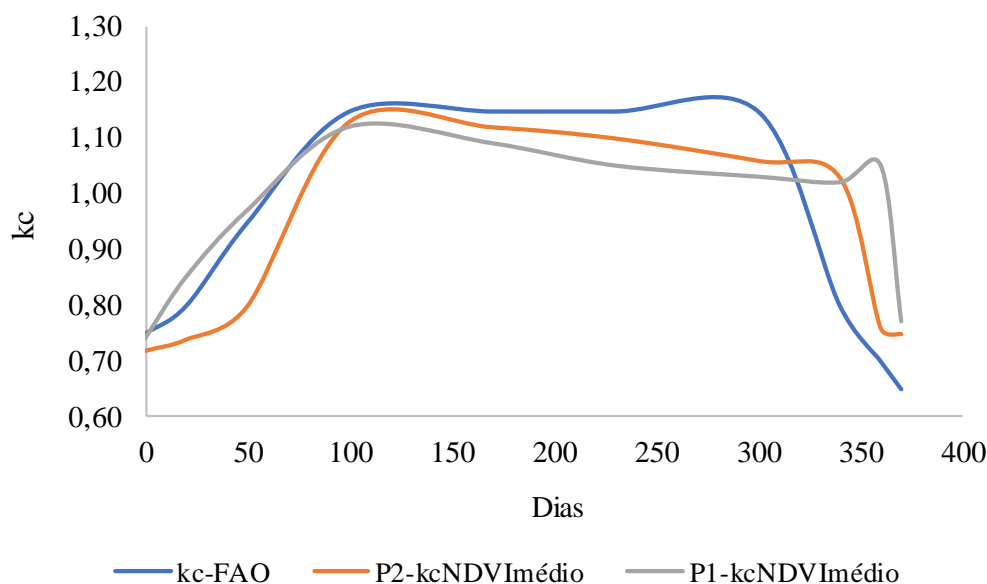


Figura 12: Perfis temporais de NDVI, $kc_{\text{-FAO}}$ e $kc_{\text{-NDVI}}$.

Oliveira et al. (2015) encontraram valores $kc_{\text{-NDVI}}$ superiores em relação ao $kc_{\text{-FAO}}$ em áreas de soja irrigada, em Planura-MG. Esquerdo e Zullo (2007), na análise dos perfis temporais de NDVI gerados a partir de dados de sensoriamento remoto, entre eles, o produto VGT-S10,

para a cultura de soja no oeste do Paraná, encontraram semelhança nas curvas de $kC_{\text{-NDVI}}$ e $kC_{\text{-FAO}}$. Bezerra (2010) afirma que a refletância espectral das culturas agrícolas é capaz de fornecer uma estimativa indireta dos valores de kC , fato que pode ser constatado na presente pesquisa, por meio da semelhança entre as curvas de $kC_{\text{-FAO}}$ e $kC_{\text{-NDVI}}$.

4.2 Variabilidade temporal dos elementos climáticos no Distrito de Nhamatanda

Os resultados da análise descritiva de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura média do ar e evapotranspiração de referência pelos métodos de Hargreaves-Samani ($ET_0\text{-HS}$) e Camargo ($ET_0\text{-CA}$) estão apresentados na Tabela 3. Por meio da análise dos dados obtidos, as variáveis de umidade relativa do ar, $ET_0\text{-HS}$ e $ET_0\text{-CA}$ apresentaram uma distribuição assimétrica a esquerda, fato confirmado pelo valor negativo do coeficiente de assimetria, enquanto que os demais elementos climáticos apresentaram uma distribuição assimétrica à direita, confirmado pelos valores positivos. Segundo Guimarães (2004) o coeficiente de assimetria mostra o afastamento da variável em relação a um valor central, fato que pode ser observado na Figura 16 em Anexo.

A variável $ET_0\text{-CA}$ apresentou a distribuição leptocúrtica enquanto que as restantes, apresentaram distribuição platicúrtica, ou seja, com curtose menor que zero, mostrando uma tendência desses atributos apresentarem maior dispersão dos dados em torno da média. É importante ressaltar que o software GS+ 7.0 utilizado neste trabalho, adota como padrão o valor zero para distribuição mesocúrtica.

Quanto à variabilidade dos dados, mensurada pelo CV (%), os menores valores de coeficientes foram encontrados para temperatura média do ar e foi classificado como baixo ($CV < 12\%$), a umidade relativa do ar, $ET_0\text{-HS}$ e $ET_0\text{-CA}$ foram classificadas como média ($12\% < CV < 60\%$) e a precipitação como alta ($CV > 60\%$), com base nos limites do CV propostos por Warrick e Nielsen (1980). A alta variabilidade da variável precipitação pode ser explicada pela ausência quase total de chuvas em alguns meses, em certos anos, ao longo da série estudada gerando grande amplitude nos dados, que interfere no desvio padrão. Por este motivo, estimativas feitas com a média aritmética podem apresentar precisão e confiabilidade duvidosas, pelo fato dessa medida de posição não ser a mais adequada para representar a variável, pois é altamente influenciada por valores extremos (SILVA et al., 2003). Segundo Landim (2003), o coeficiente de variação fornece uma medida relativa da precisão do experimento, sendo bastante útil na avaliação da dispersão dos dados.

Tabela 3: Estatística descritiva das variáveis climáticas, considerando o período de 1985 a 2014

Variável	N	Máx.	Med.	Mín.	σ	σ^2	CV	Cs	Ck
Precipitação	352	250,0	108,0	10,0	68,0	4610,0	63,0	0,60	-0,60
UR	358	90,0	65,0	40,0	17,0	283,0	26,0	-0,06	-1,37
Temperatura	334	30,0	22,0	13,0	4,0	16,0	10,0	0,34	-0,84
ET ₀ -HS	360	200,0	127,0	28,0	43,0	1849,0	34,0	-0,08	-1,16
ET ₀ -CA	360	146,0	90,0	0	40,0	1600,0	44,0	-0,45	0,45

Precipitação em mm mês⁻¹, temperatura em °C, UR:umidade relativa em %, ET₀-HS em mm mês⁻¹, ET₀-CA em mm mês⁻¹, σ : desvio padrão, σ^2 : variância, CV: coeficiente de variação (%), N: número de observações, Cs: coeficiente de assimetria e Ck:coeficiente de curtose.

Na Tabela 4 estão apresentados os modelos e parâmetros dos semivariogramas das variáveis climáticas estudadas. Todas variáveis apresentaram um bom grau de ajuste do modelo explicado pelo alto coeficiente de determinação (R^2), mostrando o quanto o modelo teórico explica a variabilidade total das variáveis em estudo.

Tabela 4: Modelo e parâmetros do semivariograma das variáveis climáticas estudadas

Variável	RSS	r^2	Co	C _{0+c}	Ao	IDT (%)	Modelo
Precipitação (mm/mês)	1009708	0,96	450	5046	3	91	Gaussiano
UR (%)	10383	0,91	0,1	313	3	100	Gaussiano
T med. (°c)	41.2	0,90	0,01	18.26	3	99	Gaussiano
ET ₀ -HS (mm/mês)	206914	0,94	29	2051	6	99	Esférico
ET ₀ -CA(mm/mês)	19723	0,95	357	1788	7	80	Esférico

T: temperatura do ar, UR: umidade relativa ar, r^2 : coeficiente de determinação, RSS: Erro padrão da média, C₀: efeito pepita, C_{0+c}: patamar, A₀: Alcance, IDT: índice de dependência temporal.

As variáveis precipitação, umidade relativa do ar e da temperatura média do ar apresentaram alcance (Ao) de três meses. As variáveis de ET₀-HS e ET₀-CA apresentaram alcance de 6 e 7 meses, respectivamente. Acima desse valor de alcance as observações passam a ser independentes. Quanto ao efeito pepita (Co), as variáveis temperatura média do ar, umidade relativa do ar e ET₀-HS apresentaram valores baixos, em relação as restantes variáveis. Este fato significa que existe uma descontinuidade do semivariograma à menor distância temporal.

A dependência temporal apresentou-se alta em todas as variáveis climáticas, considerando os limites propostos por Zimback (2001), em que a dependência temporal para valores $\leq 25\%$ é considerada fraca; entre 25% e 75% moderada, e $\geq 75\%$ dependência forte.

Quanto a análise semivariográfica, todas as variáveis analisadas apresentaram dependência temporal, com modelos matemáticos dos semivariogramas experimentais simples ajustados pelo modelo gaussiano para as variáveis precipitação, umidade relativa do ar e temperatura média do ar e pelo modelo esférico para as variáveis ET₀-HS e ET₀-CA (Figura 13).

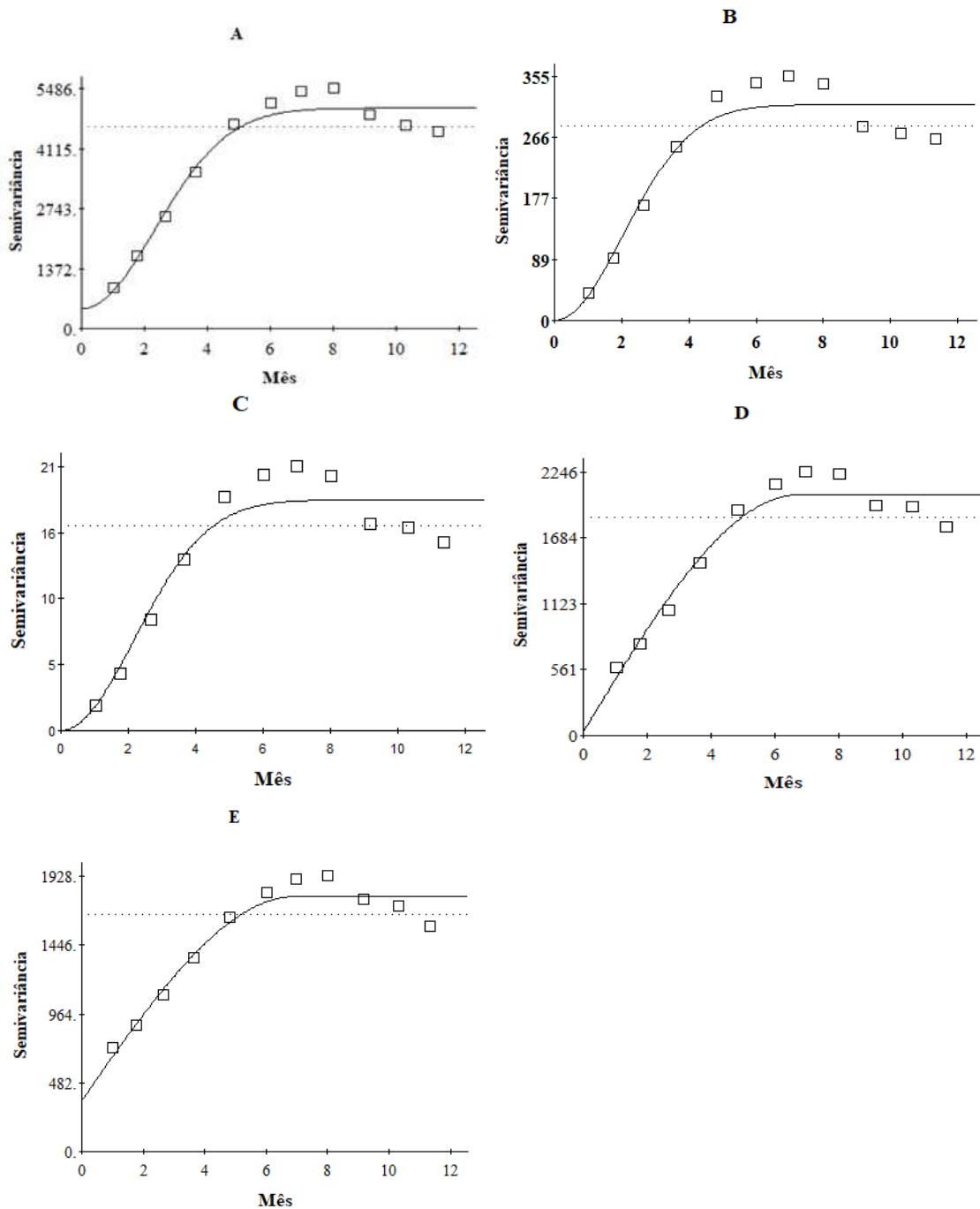


Figura 13: Semivariogramas das variáveis climáticas precipitação (A), umidade relativa do ar (B), temperatura do ar (C) ET₀-HS (D) e ET₀-CA (E).

Alcançada a dependência temporal das variáveis e para a visualização da variabilidade temporal ao longo da série, fez-se a interpolação por meio da krigagem ordinária, estimando sem tendenciosidade e com variância mínima os valores não observados a partir dos observados (Figura 14).

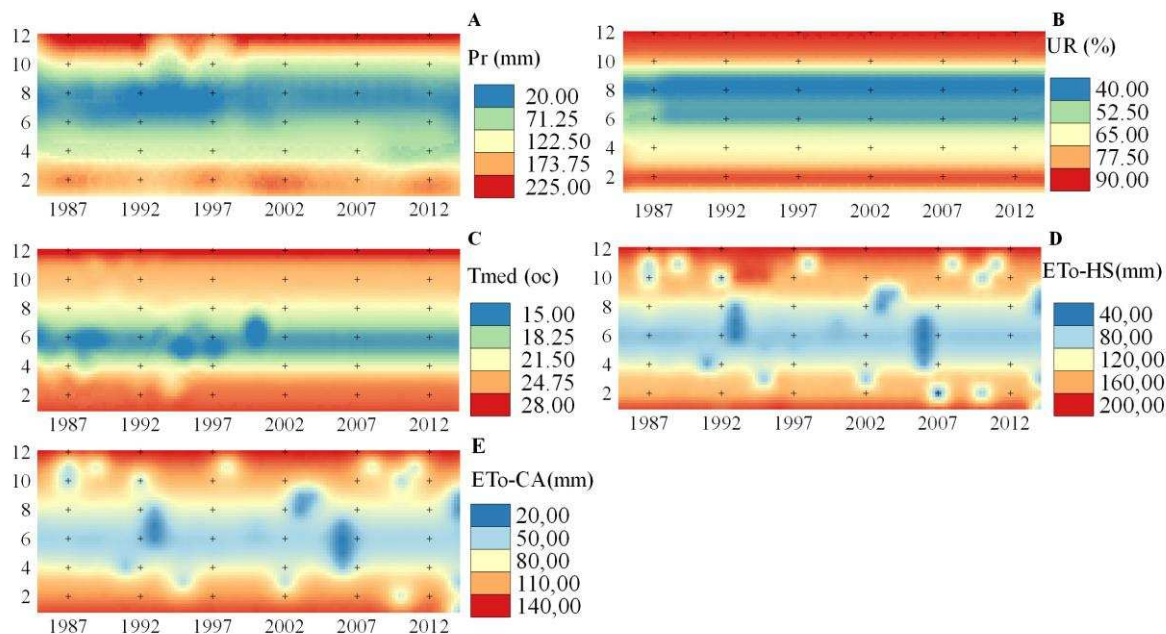


Figura 14: Mapas temáticos de distribuição temporal das variáveis precipitação (A), umidade relativa do ar (B), temperatura média do ar (C), ET_0 -HS (D) e ET_0 -CA (E).

Durante o período analisado os menores valores de precipitação (Figura 14A) ocorreram entre maio a outubro, enquanto os maiores foram verificados entre novembro a março, com mais enfoque para os meses de janeiro e fevereiro, representado acima de 100% em relação à média anual. Filgueiras et al. (2016), estudando a dinâmica espaço-temporal de variáveis climatológicas do distrito irrigado de Gorutuba no estado de Minas Gerais, com características similares do local de estudo deste trabalho, observou fortes intensidade de chuvas em novembro e dezembro, representando 45% da média anual de precipitação. Resultados similares a estes foram encontrados por Sartori et al. (2010), trabalhando com dados climáticos de 1988 a 2006, no município de Botucatu (SP). Esses autores observaram os maiores valores de precipitação entre janeiro e fevereiro.

Os menores valores de umidade relativa do ar (Figura 14B) ocorreram entre junho a setembro, enquanto os maiores foram observados entre outubro a março. Em relação à temperatura média (Figura 14C) os menores valores foram observados entre abril e julho, sendo os maiores valores (24-28°C) foram observados entre outubro a março.

Em relação aos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, a ET_0 -HS (Figura 14D) e ET_0 -CA (Figura 14E), todas metodologias mostraram um comportamento semelhante ao longo do tempo. Para ambas, os maiores valores foram observados entre outubro a março e os menores foram observados entre abril e agosto. Entretanto, a metodologia da ET_0 -HS em relação a ET_0 -CA apresentou superiores ao longo de todo tempo. São raros, na literatura, trabalhos de evapotranspiração utilizando geoestatística. Porém, resultados similares a estes

foram encontrados por Filgueiras et al. (2016), onde o comportamento entre ET_0 -HS e ET_0 -PM ao longo de toda série estudada foi similar, contudo, a primeira metodologia, ET_0 -HS, apresentou valores superiores. Foram escolhidas as duas metodologias (ET_0 -HS e ET_0 -CA) pelo facto da região de estudo ser classificada de semi-úmida consequentemente a ET_0 -HS superestimou em relação a ET_0 -CA desenvolvida para regiões úmidas.

4.3 Distribuição espaço temporal da ET_0 máxima do Distrito de Nhamatanda pelo MOD16

Na Figura 15 está representada a distribuição espaço temporal da evapotranspiração referência máxima estimada pelo MOD16 referente ao período compreendido entre janeiro de 2000 a dezembro 2014 para o distrito de Nhamatanda. A evapotranspiração oscilou no intervalo entre 118 e 316 mm $mês^{-1}$. As imagens referentes aos meses (outubro a janeiro), que abrange a época chuvosa no Distrito apresentaram maiores valores de evapotranspiração em relação às imagens do período de pouca chuva na região (maio a julho). Segundo Ruhoff et al. (2009) a evapotranspiração é dependente da variação da radiação solar incidente, ao processo de circulação atmosférica local que regula o sistema de precipitações e as condições de umidade do ar e do solo, além de influenciar também às condições da vegetação que apresentaram modificações consideráveis de acordo com as estações chuvosas e secas.

Moraes e Oliveira (2015), analisando evapotranspiração em remanescentes florestais da Mata Atlântica no Estado de São Paulo, utilizando produtos do MOD16, mas para a estimativa da evapotranspiração real, verificaram que nos meses de agosto e janeiro apresentaram, respectivamente, a menor e maior evapotranspiração média mensal. Os menores valores foram registados nos meses de setembro e outubro e os maiores de janeiro a março.

Fazendo uma análise crítica com os valores máximos de ET_0 -HS (200 mm $mês^{-1}$) e ET_0 -CA (146 mm $mês^{-1}$), apesar do período de análise ser diferente, observa-se uma superestimação do MOD16 em relação a metodologia de Camargo. Entretanto, não se fez o ajuste do modelo nesta pesquisa, devido à falta de um período base de uma série histórica coincidente das informações necessárias e de uma estação climatológica dentro do perímetro irrigado.

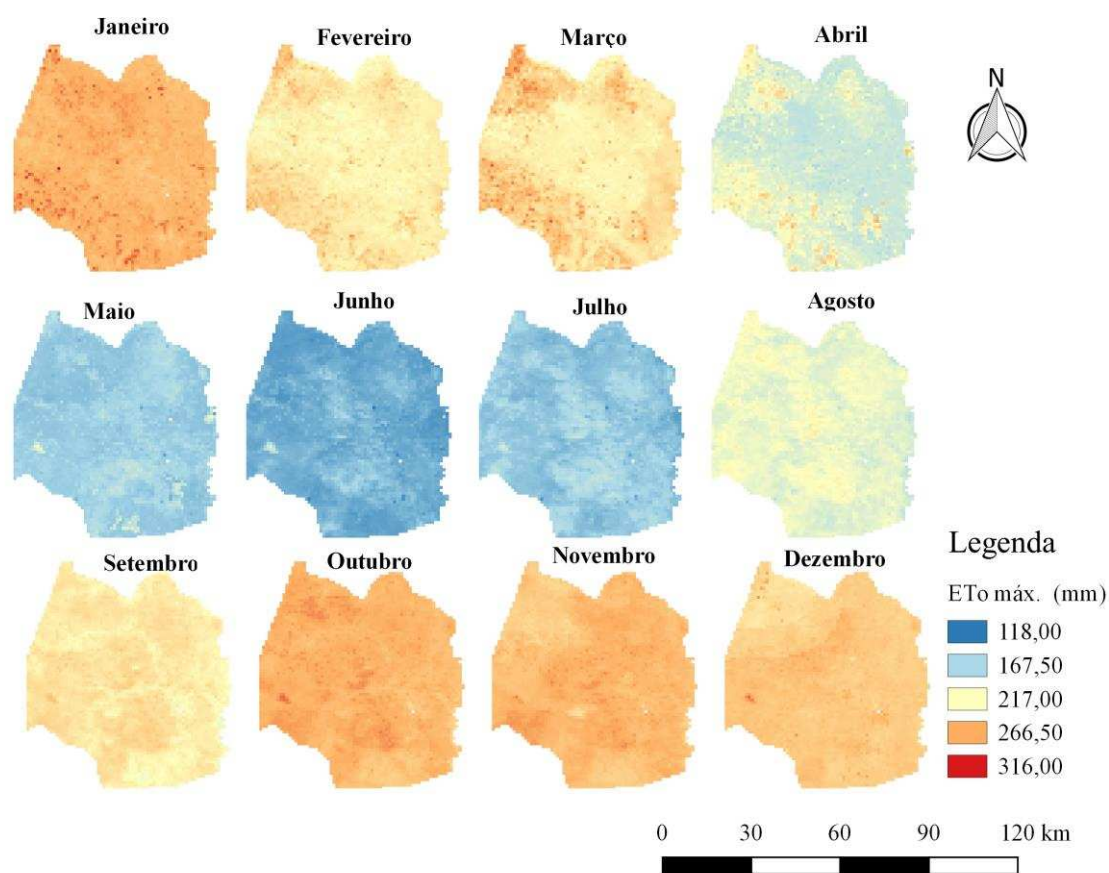


Figura 15: Distribuição espaço- temporal da ET₀ máxima pelo MOD16.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, de modo geral, são úteis para a empresa açucareira de Mafambisse, pois, com o uso das geotecnologias é possível auxiliar na identificação rápida de problemas, como uniformidade irregular das culturas; problemas de estabelecimento das mesmas, problemas no manejo de irrigação, entre outras. Futuramente, a empresa pode expandir a área irrigada baseando-se no conhecimento da evapotranspiração de referência máxima do distrito e da variabilidade dos elementos climáticos, uma vez que, a comparação de chuva e a ET₀ auxiliam no dimensionamento do sistema de irrigação das culturas, no balanço hídrico climatológico, indicando períodos de excessos e deficiências de umidade ao longo do ano ou da estação de crescimento das culturas.

O resultado gerado nesta pesquisa pode auxiliar, também, o SDAE (Serviços Distritais de Atividades Econômicas) de Nhamatanda e outras empresas que pretendem iniciar com projetos de irrigação, como também é importante para o estudo e a realização do zoneamento agroclimático na região.

5 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se:

1. O cálculo de NDVI por pivô central mostra-se eficaz no monitoramento da cultura da cana-de-açúcar em campo na empresa açucareira de Mafambisse.
2. O NDVI pode ser utilizado como uma alternativa indireta na obtenção do coeficiente de cultura da cana-de-açúcar.
3. As variáveis climáticas apresentam forte dependência temporal, baixo alcance para a precipitação, umidade relativa do ar e temperatura média e conseqüentemente menor estabilidade climática.
4. O produto MOD16 se caracteriza como uma importante ferramenta no cálculo da evapotranspiração de referência máxima, que poderá auxiliar em projetos de irrigação no distrito de Nhamatanda.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROSMART, (**Imagens mensais de satélite NDVI-Identifica anomalias nas lavouras**) disponível em <https://www.agrosmart.com.br/blog/imagens-de-satelite-agricultura-beneficios/>. Acesso em 18 de janeiro de 2018.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência ETo padrão (FAO) para Minas Gerais na ausência de alguns dados climáticos. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, V.35, n.1, p.39-50, 2015.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. (FAO. Irrigation and Drains Paper, 56). Rome, 1998.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. C. Sensor MODIS: Uma abordagem geral. **INPE**. São José dos Campos, 2003.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e Geoestatística**. Editora Unisinos. São Leopoldo RS Brasil, p.166, 2005.

ANJOS, A. W.; DELGADO, R. C.; LYRA, B. L.; SOUZA, L. P.; SUHETT, E. R. Evapotranspiração a partir de produtos orbitais para o Estado do Rio de Janeiro. **Irriga, Botucatu**, v.1, n.1, p.126-140, 2016 (Edição especial).

BARIANI, C. J. **Combinação de modelos de balanço hídrico no solo e sensoriamento remoto para o monitoramento de áreas irrigadas**. (Tese de doutorado), Santa Maria, RS, 2016.

BATISTA, F. **Influência de modelos de dependência espacial na definição de mapas temáticos**. (Dissertação de Mestrado) Viçosa-MG, 2012.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª ed. 2ª Reimpressão. Viçosa: UFV, p. 76-79, 2006.

BEZERRA, B. G. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v.25, n.3, p.404-414, 2010.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties**. I. The semivariogram and punctual kriging. *The journal of soil science*, Oxford, 1980.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1235-1242, set, 2012.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.3, p.456-465, 2011.

CEPAGRI - CENTRO DE PROMOÇÃO DA AGRICULTURA., Maputo. Moçambique. 2013.

CLEUGH, H. A.; LEUNING, R.; MU, Q. Z.; RUNNING, S. W. **Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 106, n. 3. p.285–304, 2007.

CONGEDO, L.; **Technical Manual; *Semi-Automatic Classification Plugin*** (SCP): Release 4.3.6Rome, Italy, 2016.

EPIPHANIO, J. C. N. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura de feijão.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun. 1996.

ESA (*EUROPEAN SPACIAL AGENCY*), disponível em <<http://www.esa.int/>>. Acesso em 20 de janeiro de 2018).

ESQUERDO, J.; ZULLO JÚNIOR, J. Geração automática de perfis temporais de NDVI a partir de imagens AVHRR/NOAA e SPOT/Vegetation. In: **Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, p. 169-175, 2007.

FERNANDES, J. L. **Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo por meio de imagens SPOT VEGETATION e dados meteorológicos** (Dissertação de Mestrado) -Universidade Estadual de Campinas, 2009.

FERREIRA, F. E. P.; PEREIRA, S. B.; MARTINEZ, M. A.; SOARES, A. R.; CUNHA, F. F. Uso do software Intecperímetro® no manejo da irrigação do feijoeiro. Engenharia na agricultura. **Revista Engenharia na Agricultura**, V.25, n.03, p.249-260, 2017.

FILGUEIRAS, R.; REIS, M. M., LOPES, E. M., RIBEIRO, R. B, RAMOS., M. C. **A Spatio temporal dynamics of climatological variables 1 in the aid of decision making for irrigated agriculture**, p.9, 2016.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de textos, 3ª Ed, p.128, 2011.

FONTANA, D. C.et al. **A case estudy for crop monitoring and harvest foracast in South Brazil**. In international SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FORENVIORONMENT Cape Town, 2000.

FORMAGGIO A. R, SANCHES I. DEL. **Sensoriamento Remoto em Agricultura**. São Paulo: oficinas de textos, p.288, 2017.

GONÇALVES, E. **Características-do-Satelite-Sentinel-2A**, disponível em <http://www.sigeoambiental.com.br/wp-.pdf>, 2017. Acesso em 05/02/2018.

GUIMARÃES, E. C. **Apostila: Geoestatística Básica e Aplicada**. Uberlândia, p.78, 2004.

KAMBLE, B.; IRMAK, A.; HUBBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing.*, v. 5, p.1588-1602, 2013.

LANDINI, P.M.B. **Análise Estatística de dados Geológicos**, 2ª Ed.rev.e ampl. São –Paulo: Editora UNESP, 2003.

LISBOA FILHO, J.; IOCHPE, C. **Introdução a Sistemas de Informações Geográficas com Ênfase em Banco de Dados**. XV JAI - Jornada de Atualização em Informática, XVI Congresso da SBC, Recife-PE, 1996.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, p.908, 2006.

LUCAS, A. de A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.11, n.6, pp.607-614, 2007.

MAE: (Ministério de Administração Estatal) **Perfil do Distrito de Nhamatanda**. Maputo, p.55, 2005.

MANUSSE. M. J.B. **Produção de cana de açúcar em Moçambique**, p.20, 2012.

MENEGUETTI C. C.; MEZARоба S., GROFF A. M. Fatores relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar, **IV ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL**, Campo Mourão, p.7, 2010.

MINAG/TIA. **Ministério da Agricultura/Trabalho de Inquérito Agrícola**. Maputo, p,80, 2014.

MORAES, E. C.; OLIVEIRA G. Utilização de dados MOD16 para análise da evapotranspiração em remanescentes florestais da Mata Atlântica no estado de São Paulo entre 2000 e 2010. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB. Brasil, 2015.

MOREIRA, H. M., ITEM: (Irrigação e Tecnologia Moderna). **Revista trimestral da Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem**. ISSN 0102-115X Número 113, 2017.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3ª. ed. Viçosa, MG: UFV, p. 320, 2007.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. Editora UFV, 4ª ed, 2012.

MOURA A. R. C.; MONTENEGRO S, L.; ANTONINO A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. de. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil, **Revista Brasileira de Meteorologia**, V.28, N.2, p. 181 – 191, 2013.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, p. 519–536, 2011.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. rev. São Paulo, p. 387, 2010.

OLIVEIRA, T. C de. **Variação temporal dos índices de vegetação da soja e cana-de-açúcar e obtenção do coeficiente de cultura (kc) a partir do NDVI / Lavras: UFLA (Dissertação de Mestrado)**, p.144, 2014

OLIVEIRA, T. C de.; FERREIRA, E.; DANTAS, A. Análise de perfis temporais a partir de produtos do índice de vegetação NDVI e suas relações com o coeficiente de cultura (Kc) em áreas de soja irrigada, em Planura-MG. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 2015.

PAPADAVID, G.; HADJIMITSIS, D. Adaptation of SEBAL for estimating groundnuts evapotranspiration, in Cyprus. **South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics**, v.1, n.2, p.59-70, 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Edição Revista e Ampliada Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Departamento de Ciências Exatas Piracicaba, p.200, 2007.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G, C.; NOVA, N. A. V. **Evapotranspiração**. FUNDAG. CAMPINAS, p. 323, 2013.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, p.127, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO. Y. E. **Sensoriamento no estudo da vegetação**. São Jose de Campos: Parêntese, 2007.

QGIS Development Team, Versão 2.16.3, 2016)

QGIS, (Development Team, Versão 2.16.3, 2016)

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo Planta e Atmosfera: Conceitos processos e Aplicações**. 2ª ed, p.478, 2012.

RIBEIRO, R. B.; FILGUEIRAS R.; RAMOS M. C. A.; ALMEIDA, L. Variabilidade espaço-temporal da condição da vegetação na agricultura irrigada por meio de imagens, **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.11, nº.6, p. 1884 – 1893, 2017.

RISSO, J.; RIZZET, R.; RUDOR, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKUROL, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; EIPHANIO, R. D. V. Índices de vegetação Modis aplicados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, set. 2012.

ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User’s Guide**. Plainwell, Gamma Design Software. 2008.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. Disponível em: <<http://www.malavolta.com.br/pdf/1071.pdf>>. Acesso em: 26 de set, 2017.

ROSSI, R.; DUNGAN, J.; BECK, L. R. Kriging in shadows: geostatistical interpolation for remote sensing. **Remote Sens. Environ**, Vol. 49, No. 1, p.32-40, 1994.

RUHOFF, A. L.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A. R.; ROCHA, H. R. **Validação do algoritmo de evapotranspiração global mod16 em áreas de áreas tropicais de Cerrado no Brasil**, (Tese de Doutorado 2011).

RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISCHON, W.; UVO, C. B.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M. R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de

cerrado e cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vo.14, n.4, p.137-146, 2009.

SANCHES, I. D. Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura, XVIII Curso de Uso Escolar de Sensoriamento Remoto no Estudo do Meio Ambiente, **INPE**, julho, 2016.

SARTORI, A. A. Influência do período de estiagem no Índice de Vegetação (NDVI), no município de Botucatu-SP. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal. **Anais**, p. 4363-4369, 2009.

SARTORI, A. A.; DA SILVA, A. F.; RAMOS, C. M. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade temporal e mapeamento dos dados climáticos de Botucatu-SP, **Irriga**, Botucatu, abril-junho, v. 15, n. 2, p.133-139, 2010.

SILVA, A. F.; ZIMBACK, C. L.; OLIVEIRA, R. B. de. Cokrigagem na estimativa da evapotranspiração em Campinas. SP, **Tékhnē e Lógos**, Botucatu, SP, v.2, n.1, out. 2010.

SILVA, J. P. N.; Silva, M. N. **Noções da cultura da cana-de-açúcar Inhumas**: IFG, p.105, 2012.

SINGH, R.; IRMAK, A. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.135, 2009.

SOARES, A. **Estatística para as ciências da Terra e do Ambiente**. 2ª ed. Portugal, 2006.

SOUZA, J. L.; CALHEIROS C. B. M.; SANTOS, E. A. **Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith representativa da região do Tabuleiro costeira de Alagoas**, 2014.

VIEIRA, S. R.; CAMARGO, M. B. P.; DE SIQUEIRA, G. M. Análise espacial da temperatura e da precipitação média anual no estado de São Paulo (Brasil), **BioEng, Campinas**, 2000.

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L. Large- area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.1096- 1116, 2008.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. São Paulo. Oficina de textos: 1ª reimpressão, p. 215, 2013.

ZHANG, X.Y.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.84, p.471- 475, 2003.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 164–176, 2005.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. Unesp, Botucatu, v. 1, p. 1-54, 2001.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**: Apostila, Botucatu, junho, p.25, 2003.

7 Anexo

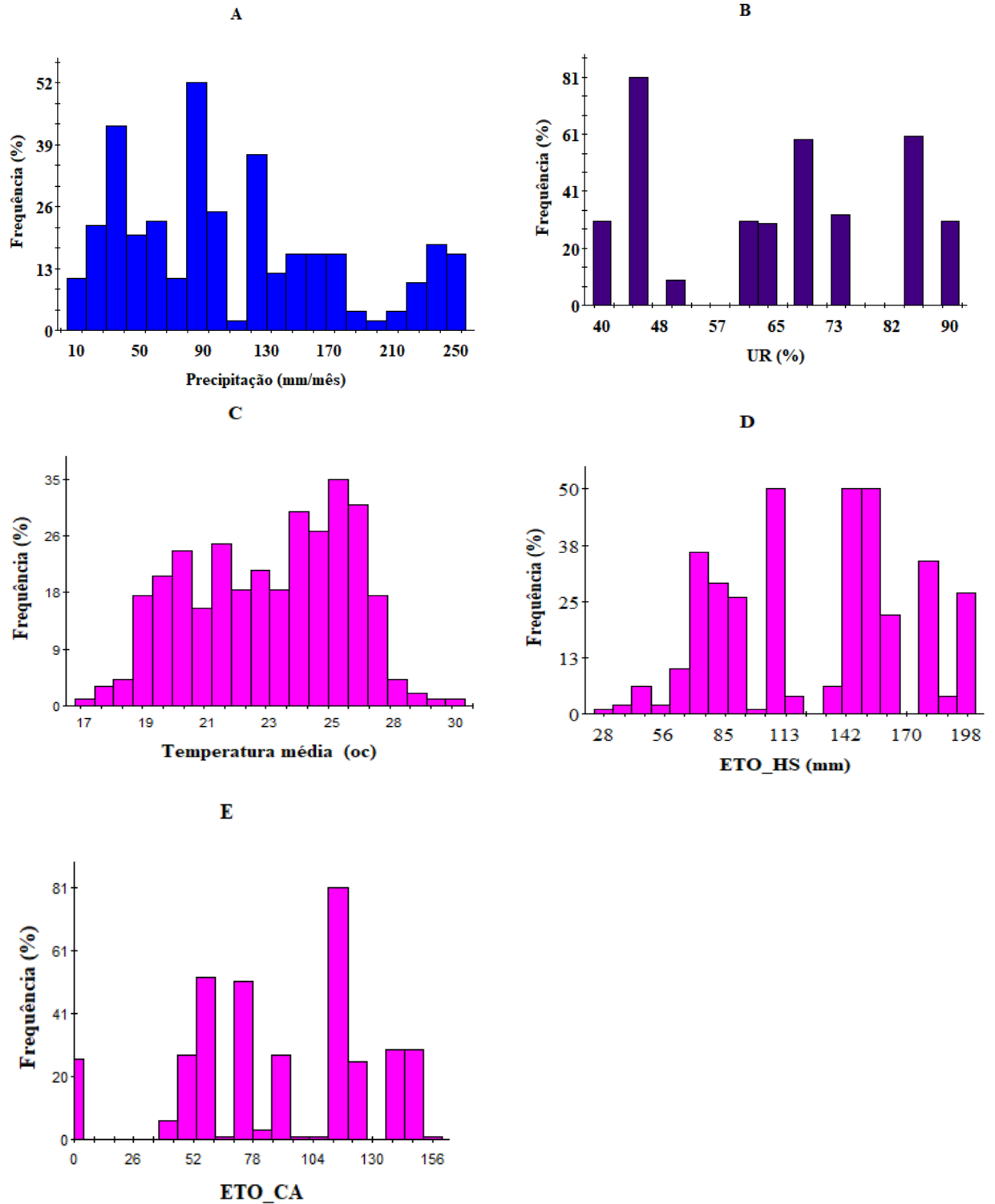


Figura 16: Gráfico de distribuição de frequência relativa das variáveis

Tabela 5: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	kcFAO	P2-kcNDVImed		kcFAO	P1-kcNDVImed
Média	0,925	0,921	Média	0,925	0,969
Variância	0,04347	0,032165556	Variância	0,043472	0,01812111
Observações	10	10	Observações	10	10
Hipótese da diferença de média	0		Hipótese da diferença de média	0	
Gl	18		gl	15	
Stat t	0,04599288		Stat t	-0,56064	
P(T<=t) uni-caudal	0,48191118		P(T<=t) uni-caudal	0,29166	
t crítico uni-caudal	1,73406361		t crítico uni-caudal	1,75305	
P(T<=t) bi-caudal	0,9638224		P(T<=t) bi-caudal	0,58332	
t crítico bi-caudal	2,10092204		t crítico bi-caudal	2,13145	

Tabela 6: Estatística de regressão entre kc-FAO e P2-kcNDVI médio

R múltiplo	0,855010354				
R-Quadrado	0,731042705				
R-quadrado ajustado	0,697423043				
Erro padrão	0,114689549				
Observações	10				
ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,286020458	0,286020458	21,74449905	0,001616929
Resíduo	8	0,105229542	0,013153693		
Total	9	0,39125			

Tabela 7: Estatística de regressão entre kc-FAO e P1-kcNDVI médio

R múltiplo	0,705648946				
R-Quadrado	0,497940434				
R-quadrado ajustado	0,435182989				
Erro padrão	0,156696684				
Observações	10				
ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	0,194819195	0,194819195	7,93436426	0,022605002
Resíduo	8	0,196430805	0,024553851		
Total	9	0,39125			

Tabela 8: Coeficiente de Person

	kcFAO	P2-kcNDVI	kcFAO	P1-kcNDVI
kcFAO	1		kcFAO	1
P2-kcNDVI	0,86	1	P1-kcNDVI	0,71