

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
UTILIZANDO ÍNDICES DE VEGETAÇÃO**

VICTOR COSTA LEDA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção de título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Julho – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
UTILIZANDO ÍNDICES DE VEGETAÇÃO**

VICTOR COSTA LEDA

ORIENTADORA: PROF^a DR^a. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção de título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Julho – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L472m Leda, Victor Costa, 1990-
Modelagem da produtividade de cana-de-açúcar utilizando índices de vegetação / Victor Costa Leda. - Botucatu : [s.n.], 2016
ix, 59 f. : ils. color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Produtividade agrícola. 2. Modelagem de dados. 3. Landsat (Satelites). I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
UTILIZANDO ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

AUTOR: VICTOR COSTA LEDA

ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA
NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Dra. BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

. / Botucatu/SP

Botucatu, 28 de julho de 2016

“Criatividade é a inteligência se divertindo”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre está presente em minha vida, por ter colocado pessoas especiais em meu caminho e pela oportunidade de chegar até aqui.

Aos meus pais, Sandra e Wlamir, por todo amor, carinho e exemplo de vida, sempre me apoiando durante a jornada acadêmica.

À Ana Cecilia Capoani Angélico e família, por me mostrar continuamente que sou capaz de superar os desafios, sempre me dando força, carinho e compreensão em todos os momentos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Célia Regina Lopes Zimback, que me acolheu e sempre esteve disposta a ajudar em assuntos acadêmicos, profissionais e pessoais.

Aos amigos do GEPAG – Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas, Anderson, Ana Paula, Diego, Tânia, Vanessa, Roberto, Donizeti, Aline e Natália, pela troca de experiências e confraternizações.

À Agrícola Rio Claro e Luiz Carlos Dalben, pelo apoio e contribuição para o desenvolvimento deste estudo.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas e ao Curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, pela oportunidade de crescimento.

A todos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais pelo excelente convívio.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO.....	4
4 REVISÃO DE LITERATURA	6
4.1 Cana-de-açúcar	6
4.2 Geoprocessamento	8
4.2.1 Sensoriamento remoto.....	8
4.2.2 Radiometria	10
4.2.3 Satélite Landsat 8	13
4.2.4 Índices de Vegetação.....	15
4.3 Índices de vegetação e produtividade	17
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1 Caracterização da área de estudo	19
5.2 Material.....	20
5.2.1 Programas para processamento de dados	20
5.2.2 Cartas topográficas.....	21
5.2.3 Imagens de Satélite.....	21
5.3 Metodologia	22
5.3.1 Processamento das imagens	24
5.3.2 Correlações.....	27
5.3.3 Regressão linear múltipla.....	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1 Colheita de 14 a 27 de abril	29
6.2 Colheita de 28 de abril a 13 de maio.....	31
6.3 Colheita de 14 a 29 de maio.....	34
6.4 Colheita de 30 de maio a 14 de junho.....	36
6.5 Colheita de 15 de junho a 16 de julho.....	38
6.6 Colheita de 17 de julho a 1 de agosto	40
6.7 Colheita de 2 de agosto a 2 de setembro.....	42
6.8 Colheita de 2 a 11 de setembro	44

6.9 Colheita de 12 de setembro a 4 de outubro.....	46
6.10 Colheita de 5 a 13 de outubro	48
6.11 Equações de produtividade	50
7 CONCLUSÕES	53
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Balanço da safra 2013/2014 e safra da 2014/2015	7
Tabela 2. Características do satélite Landsat 8.....	14
Tabela 3. Articulações das cartas topográficas do IGC para área de estudo	21
Tabela 4. Datas de passagem das imagens do satélite LANDSAT 8 que foram utilizadas no trabalho	22
Tabela 5. Parâmetros que foram utilizados na correção topográfica.....	25
Tabela 6. Produtividade e índices de vegetação em 5 de janeiro de 2014	31
Tabela 7. Produtividade e índices de vegetação em 6 de fevereiro de 2014	33
Tabela 8. Produtividade e índices de vegetação em 4 de dezembro de 2013.....	35
Tabela 9. Produtividade e índices de vegetação em 26 de março de 2014.....	38
Tabela 10. Produtividade e índices de vegetação em 11 de abril de 2014	40
Tabela 10. Produtividade e índices de vegetação em 10 de março de 2014.....	42
Tabela 12. Produtividade e índices de vegetação em 16 de julho de 2014	44
Tabela 13. Produtividade e índices de vegetação em 13 de maio de 2014.....	46
Tabela 14. Produtividade e índices de vegetação em 4 de outubro de 2014	48
Tabela 15. Produtividade e índices de vegetação em 13 de maio de 2014.....	50
Tabela 16. Equações de produtividade geradas por meio dos dados coletados nas cenas selecionadas	51

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Aquisição de informações por sensoriamento remoto.	9
Figura 2. Espectro eletromagnético.	11
Figura 3. Faixas de absorção e fatores que controlam a reflectância.	12
Figura 4. Localização da área de estudo.	20
Figura 5. Talhões de cana-de-açúcar e as respectivas datas de correlação com as imagens.	23
Figura 6. Talhões colhidos entre 14 e 27 de abril.	30
Figura 7. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 02/11/2013 e 25/04/2014.	30
Figura 8. Talhões colhidos entre 28 de abril e 13 de maio.	32
Figura 9. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 02/11/2013 e 13/05/2014.	33
Figura 10. Talhões colhidos entre 14 e 29 de maio.	34
Figura 11. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 04/12/2013 e 29/05/2014.	35
Figura 12. Talhões colhidos entre 30 de maio e 14 de junho.	37
Figura 13. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 05/01/2014 e 14/06/2014.	37
Figura 14. Talhões colhidos entre 15 de junho e 16 de julho.	39
Figura 15. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 06/02/2014 e 16/07/2014.	39
Figura 16. Talhões colhidos entre 17 de julho e 1 de agosto.	41
Figura 17. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 10/03/2014 e 01/08/2014.	41
Figura 18. Talhões colhidos entre 2 de agosto e 2 de setembro.	43
Figura 19. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 11/04/2014 e 02/09/2014.	43
Figura 20. Talhões colhidos entre 2 e 11 de setembro.	45
Figura 21. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 11/04/2014 e 11/09/2014.	45
Figura 22. Talhões colhidos entre 12 de setembro e 4 de outubro.	47

Figura 23. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 13/05/2014 e 04/10/2014.	47
Figura 24. Talhões colhidos entre 5 e 13 de outubro.....	49
Figura 25. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 13/05/2014 e 13/10/2014.	49

1 RESUMO

A produção da cana-de-açúcar é destaque no cenário econômico do estado São Paulo, dessa forma confirma-se a necessidade do monitoramento dessa cultura, de maneira a contribuir com melhorias em decisões e planejamentos operacionais. A produção total e a produtividade da cana-de-açúcar são fatores de grande interesse para os agricultores, pois é a partir dessa informação que a programação das operações são realizadas, porém, essas estimativas não possuem métodos de alta precisão e confiança em amostragens não destrutivas. O homem possui excelente capacidade de analisar e interpretar resultados, mas também está sujeito a subjetividades em suas avaliações. A análise empreendida no trabalho teve como objetivo a elaboração de modelos matemáticos que expliquem a produtividade da cana-de-açúcar por meio das técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. O experimento foi realizado na área de produção comercial da Agrícola Rio Claro, parceira do grupo Zilor, que está localizada nos municípios de Lençóis Paulista e Pratânia, possui aproximadamente 6000 hectares, com altimetrias variando entre 600 e 700 metros. Para a coleta das informações espectrais, utilizou-se as imagens do satélite *Landsat 8*, com órbita/ponto em 221/076. Nos resultados do trabalho realizado, constatou-se que as modelagens foram satisfatórias, variando o coeficiente de determinação entre 0,15 a 0,97. Sendo que em períodos com elevados coeficientes de determinação, podem geralmente ser encontradas áreas de forma aglomerada, o que sugere uma menor incidência

de variáveis. Enquanto que em períodos com coeficientes de determinação baixos, muito provavelmente foram obtidos devido a outros fatores listados terem ocorrido como dispersão dos talhões na área, classes de solo, precipitação e variedades da cultura, provavelmente distintos.

Palavras-chave: Regressão linear múltipla, NDVI, MSAVI2, EVI, Landsat 8.

SUGARCANE PRODUCTIVITY MODELING USING VEGETATION INDEX.

Botucatu, 2016. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: VICTOR COSTA LEDA

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

2 SUMMARY

The production of sugarcane is a highlight in the economic scenario in the state of São Paulo, thus it confirms the need of monitoring this culture, in order to contribute to improvements in making decisions and operational planning. The production and productivity of sugarcane are factors of great interest to farmers, because, from this information the planning of operations is performed out, however, these estimates do not have high precision and reliable methods for non-destructive sampling. The human has an excellent ability to analyze and interpret results, but may also be affected by the subjectivity of their evaluations. The analysis undertaken in this work aimed at the development of mathematical models to explain the productivity of sugarcane through geoprocessing and remote sensing. The experiment was conducted in commercial area of Agrícola Rio Claro, partner of Zilor group, which is located in Lençóis Paulista and Pratânia, of approximately 6000 hectares, with altimetry ranging between 600 and 700 meters. For the collection of the spectral information, it was used the images of the satellite Landsat 8, with orbit/point 221/076. The results of the work, it was found that all the modeling were satisfactory, varying the coefficient of determination between 0.15 to 0.97. Given that, in periods with high coefficients of determination areas may be generally found in clusters, suggesting a lower incidence of variables. While in periods of low coefficient of determination, it was most likely obtained due to other factors listed of having occurred such as a dispersion of the plots in the area, soil types, rainfall and varieties, probably distinctly.

Keywords: Multiple linear regression, NDVI, MSAVI2, EVI, Landsat 8.

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar tem participação acentuada no meio econômico brasileiro desde o período colonial e as perspectivas apontam para a solidificação e expansão de seu uso como matéria-prima na produção de energia renovável. Desta forma, a reintegração de políticas agroenergéticas brasileiras está influenciando o arranjo espacial da produção canavieira, com tendências a expansão em diversas regiões. Essa gradual expansão vem a contribuir para que o país se destaque como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar.

O desempenho da produção canavieira está correlacionado aos elementos de produtividade. Para se obter sucesso, qualidade e alta produtividade é preciso que haja adequada relação entre fatores como: solo, clima, variedade da cana, plantas invasoras, doenças, pragas e nutrientes. Sabe-se que a estimativa de produção é um dos dados mais importantes para o planejamento do setor, e que o monitoramento das áreas agrícolas e as estimativas de produção e produtividade realizadas com o uso de geotecnologias e sensoriamento remoto tendem a colaborar expressivamente para se alcançar métodos de baixo custo e eficazes.

O surgimento e a ampliação das geotecnologias na área de sensoriamento remoto, mais especificamente no uso de sensores orbitais, têm contribuído para o desenvolvimento de metodologias inovadoras no mapeamento de áreas ambientais,

agrícolas e urbanas. Observou-se que uma das principais aplicações dos dados de sensoriamento remoto tem sido, historicamente, o mapeamento das áreas agrícolas. Este mapeamento é um método essencial na estimativa da produtividade agrícola, em avaliações da biodiversidade, em estudos ambientais, no apoio às decisões de ações sociais, políticas e econômicas e na previsão de safras.

Sabe-se que as imagens de sensoriamento remoto têm peculiaridades favoráveis no monitoramento da cultura da cana-de-açúcar, pois a vegetação possui comportamento espectral que permite detectar variações por meio das imagens do satélite Landsat-8, que recobre sistematicamente o território brasileiro a cada 16 dias. Além disso, o uso dessas imagens possibilita fazer o acompanhamento da cultura ao longo do ciclo. Imagens livres de cobertura de nuvens têm maior probabilidade de serem adquiridas entre os meses mais secos, que corresponde ao período de maior intensidade de colheita da cana.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e a União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), desenvolvem o projeto CANASAT que, por meio do sensoriamento remoto, mapeiam as áreas cultivadas e a forma de colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Este mapeamento se dá com o uso de índices espectrais de vegetação ou simplesmente índices de vegetação, os quais são largamente aplicados no monitoramento da cobertura vegetal em escalas globais ou locais. Tais índices são arranjos de dados espectrais de várias bandas, selecionadas com o objetivo de condensar e refinar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos de produção e produtividade.

Foram estudados aspectos da cultura da cana-de-açúcar nos municípios de Lençóis Paulista e Pratânia, sendo que o objetivo geral do projeto foi modelar as correlações de produtividade da cana-de-açúcar com índices de vegetação obtidos por meio de análise de imagens orbitais.

São objetivos específicos deste estudo:

- Obter as imagens orbitais referentes ao período estudado;
- Produzir os índices de vegetação em cada período analisado;
- Correlacionar índices de vegetação com os dados de produtividade;
- Modelar os dados para se obter equações que representem a produtividade a partir dos índices de vegetação;

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à ordem *Graminales*, família *Poaceae*, gênero *Saccharum*. Morfologicamente, os rizomas são constituídos por gemas, internódios e nós e o colmo é caracterizado por nós e entrenós bem marcados. As raízes são fasciculadas contendo 85% do sistema radicular nos 50 centímetros superficiais. Fisiologicamente, a cana-de-açúcar é uma planta C4, ou seja, possui elevada taxa de fotossíntese, maior eficiência na utilização e resgate de CO₂, alta adaptabilidade às condições de elevadas temperaturas, luminosidade e relativa escassez de água. A principal via de absorção é pelo sistema radicular, mas apresentando também alta capacidade de absorção pelas folhas (URIBE, 2010).

O Brasil apresenta condições climáticas e geográficas privilegiadas para as práticas agrícolas. Dessa forma, a agricultura sempre foi um dos setores de grande importância para a economia, com enfoque na cana-de-açúcar, que é de fundamental valor para o agronegócio brasileiro, permitindo a produção de açúcar, energia e etanol (GOLDEMBERG, 2008).

A alta demanda por energias renováveis, quando comparada a combustíveis fósseis, trouxe a cana-de-açúcar como destaque, inaugurando uma nova fase para o setor sucroalcooleiro. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, além

de destacar-se como maior produtor e exportador de açúcar e etanol provenientes dessa cultura, tendo a região Centro-Sul como principal produtora (CONAB, 2016).

No levantamento realizado pela UNICA (2015), o Brasil apresentou uma diminuição na produção da safra 2014/2015, como demonstrado na Tabela 1. Segundo o autor houve uma diminuição de 4,31% no total da moagem e, conseqüentemente, uma redução na produção de açúcar. Dessa forma, observa-se a necessidade de investimentos tecnológicos para retomar o ritmo crescente. Além disso, é possível observar que a ausência de políticas públicas consolidadas para esta área prejudicou o setor.

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é tradicional, bem estabelecida e vem sendo muito competitiva em relação aos outros países produtores. Além do que, a cana-de-açúcar representa o terceiro maior cultivo em área do país, atrás da soja e do milho. As previsões para 2020 são de expansão da área plantada, que deve superar 12,9 milhões de hectares, visando suprir a crescente demanda do mercado interno e externo por etanol, açúcar e todos os outros subprodutos (MAPA, 2010).

Tabela 1. Balanço da safra 2013/2014 e safra da 2014/2015

Produtos	Safras		Variação (%)
	2013/2014	2014/2015	
Moagem			
Cana-de-açúcar (mil toneladas)	597.061	571.344	-4,31
Produção			
Açúcar (mil toneladas)	34.295	31.987	-6,73
Etanol anidro (milhões de litros)	11.008	10.755	-2,29
Etanol hidratado (milhões de litros)	14.568	15.390	5,65
Etanol total (milhões de litros)	25.575	26.146	2,23
Qualidade da cana			
Açúcar Total Recuperável (mil toneladas)	79.906	78.036	-1,97
kg de ATR/toneladas de cana	133,83	136,58	2,45

Fonte: UNICA (2015)

Os maiores estados produtores de cana-de-açúcar na região centro-sul do país, no ano de 2015, foram: São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Espírito Santo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. A produção brasileira nessa safra foi destinada em 43% para açúcar e 57% para etanol (UNICA, 2015).

Em função de seu ciclo perene, a cana-de-açúcar sofre influência de variações climáticas durante todo o ano. Para conseguir o máximo crescimento vegetativo e

elevada produção de sacarose, a cultura necessita de condições de temperatura e umidade adequadas, seguida de um período com restrição hídrica ou térmica para auxiliar o acúmulo de açúcares na época da colheita. As melhores condições de produção acontecem quando a cana-de-açúcar passa por um período de intensa radiação solar, com condições favoráveis de umidade e temperatura na fase de crescimento vegetativo, seguido por um período seco próximo às fases de maturação (ALFONSI et al., 1987).

4.2 Geoprocessamento

De acordo com Câmara e Medeiros (1998), o geoprocessamento é definido por um conjunto de técnicas computacionais e matemáticas para o estudo de informações geográficas. Os conceitos do geoprocessamento envolvem a manipulação e representação computacional de fenômenos do mundo real, mediante algoritmos e estruturas de dados (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

O geoprocessamento permite analisar não somente conjuntos de dados georreferenciados, mas também de maneira isolada, permitindo o tratamento de informações e o desenvolvimento desse setor na agricultura. O uso desse método possibilita o tratamento de dados e soluções utilizando modelagens e simulações de cenários (BUCENE, 2002). Pode ainda ser definido, segundo Rodrigues (1990), como o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento de informações espaciais, desenvolvimento e uso de sistemas que a utilizam.

As ferramentas utilizadas para realizar o geoprocessamento são denominadas por um conjunto chamado de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que é empregado em diversas áreas de estudo como geografia, cartografia, agricultura, planejamento urbano e rural (MOREIRA, 2005).

Por meio de um SIG, tanto a produção de cartas e mapas, quanto as integrações de informações são automatizadas, proporcionando ao usuário armazenar e integrar dados geográficos de diferentes fontes e escalas (FLORENZANO, 2002).

4.2.1 Sensoriamento remoto

A base do sensoriamento remoto é a aferição de energia eletromagnética emitida ou refletida pela superfície terrestre utilizando sensores específicos.

O desenvolvimento de novos métodos de sensoriamento remoto conduziu a uma melhor compreensão de como os valores de reflectância modificam-se com o decorrer do desenvolvimento do dossel (AHAMED et al., 2010).

Segundo Lillesand e Kiefer (1994), o sensoriamento remoto é uma ciência cuja finalidade é conseguir informações sobre um objeto por meio da análise de dados obtidos por um dispositivo que não esteja em contato com o alvo da investigação, como demonstrado na Figura 1.

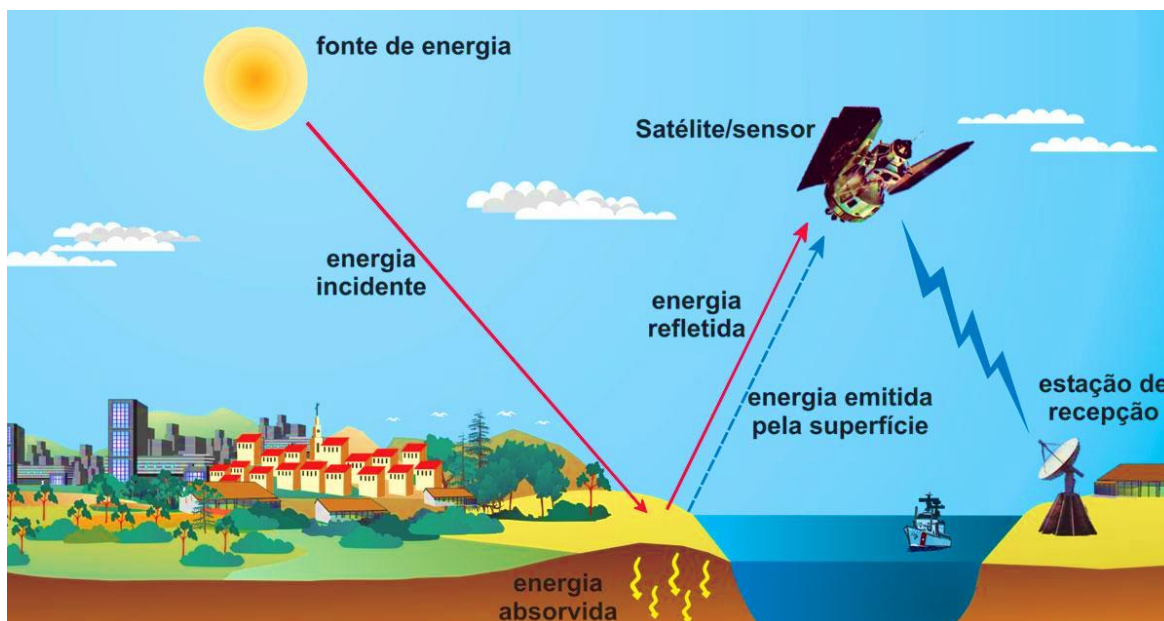


Figura 1. Aquisição de informações por sensoriamento remoto.
Fonte: FLORENZANO, 2002.

No instante em que a radiação solar incide no topo da atmosfera, uma parcela dessa radiação é dispersa e/ou refletida por partículas atmosféricas e, a outra parcela atravessa a atmosfera e atinge o alvo. Dessa forma, pode-se observar três fenômenos que acontecem com o fluxo de radiação eletromagnética (ROSA, 2003):

Absortância: é a razão entre o fluxo de radiação absorvido pelo alvo, dividido pelo fluxo de radiação incidente, ou seja, é a radiação incidente absorvida por uma superfície;

Reflectância: é o resultado da divisão entre o fluxo de radiação refletido pelo alvo e o fluxo de radiação eletromagnética incidente. É a porcentagem da radiação refletida em relação a radiação incidente sobre a superfície;

Transmitância: é o fluxo de radiação transmitido pelo alvo dividido pelo fluxo de radiação incidente.

A característica espectral de cada alvo, seja ele água, solo ou vegetação, é o resultado da relação da energia eletromagnética com as propriedades físicas e químicas específicas dos alvos terrestres, que são registradas pelos sensores que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético. As características espectrais dos alvos são registradas por diferentes sensores de acordo com as suas distintas especificações (VALÉRIO FILHO, 1998).

Os principais objetivos do sensoriamento remoto no meio agrícola são caracterizar áreas, facilitar o manejo e aperfeiçoar a gestão operacional. As diversas culturas agrícolas comerciais dependem de um monitoramento próximo, permitindo uma gestão eficiente dos recursos disponíveis, para que se obtenha um saldo positivo com as práticas agrícolas sustentáveis (BENEDETTO et al., 2013; THENKABAIL et al., 2012).

Frequentemente, em canaviais, as observações com sensoriamento remoto estão relacionadas à classificação, mapeamento, manejo e estimativas (PICOLI et al., 2009). Para o desenvolvimento de uma avaliação precisa e eficaz, tendo em vista a variação espacial na escala exigida pela agricultura de precisão, há uma demanda crescente para aquisição rápida, barata e não evasiva de informações da planta e do solo em escala precisa. O elevado custo da tradicional amostragem e análises laboratoriais sugerem a necessidade de uso de dados espectrais, que podem detectar condições irregulares e oferecer evidências de que uma anomalia está presente no local estudado (ADAMCHUCK, 2011).

4.2.2 Radiometria

Segundo Novo (2008), a Radiação Eletromagnética (REM) é uma forma complexa de energia que se manifesta a partir da interação com a matéria e é dessa forma que informações são transferidas do objeto em estudo ao sensor.

O sol é a fonte de REM mais importante para o planeta Terra. Dessa forma, a REM é definida como ondas ou partículas eletromagnéticas que se movem à velocidade da luz, sem a necessidade de um meio material para sua propagação no espaço (ROSENDO, 2005).

A representação contínua da radiação eletromagnética (Figura 2) é denominada de espectro eletromagnético, sendo subdividido em intervalos que vão dos comprimentos de onda, como radiação gama e raio X, até os grandes comprimentos que abrangem micro-ondas e ondas de rádio (PONZONI, 2001).

De acordo com Steffen (1996), radiações eletromagnéticas receberam designações de natureza histórica ou decorrente de processos utilizados em sua produção. Dentre as radiações conhecidas destacam-se os raios gama, que são produzidos por explosões nucleares e átomos radioativos, possuem alto poder de penetração aos objetos. São utilizados na produção de imagens do universo e na medicina. Também destaca-se os raios-x, que são ondas de energia que possuem menor poder de penetração quando comparado aos raios gama, também utilizado na medicina.

Também destaca-se a radiação ultravioleta, que está localizada em uma faixa estreita do espectro, anteriormente a região do espectro visível e comumente é utilizado em observatórios de astronomia. A luz visível, que situa-se entre os comprimentos de onda entre 400 nm a 700 nm. Radiações neste intervalo, quando incididas no sistema visual humano, provocam a sensação de cor (LILLESAND; KIEFER, 1994).

A radiação infravermelha, que está numa frequência além da capacidade de visão humana, onde os comprimentos de onda estão entre 700 nm e 50000 nm.

Também existe a radiação por micro-ondas, que é classificado como média frequência, geralmente este tipo de radiação interage com moléculas polares, que não remove elétrons ao interagir com a matéria. E as ondas de rádio, que possuem maior comprimento de onda quando comparado aos outros tipos de radiação eletromagnética, com frequências de 100 a 109 Hz.

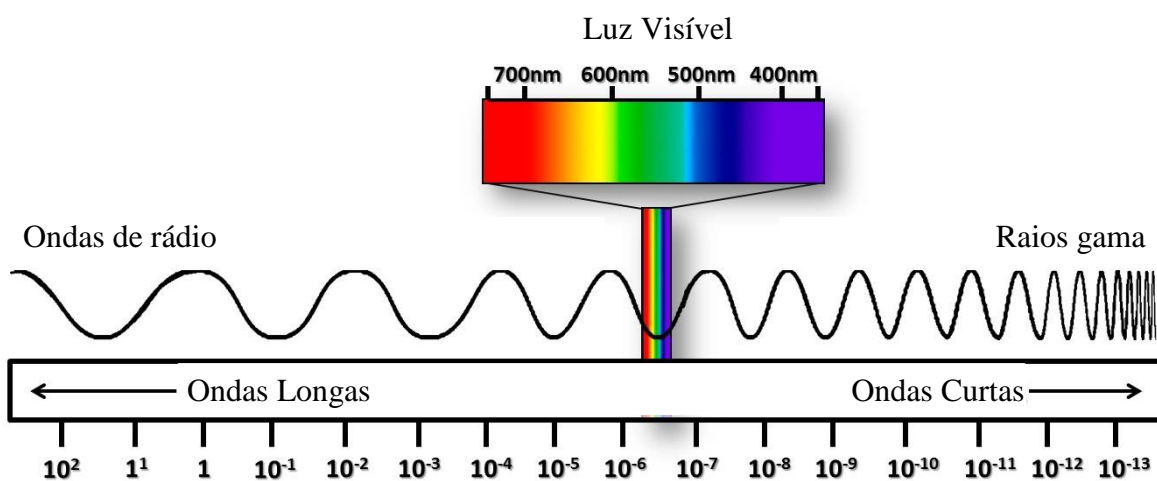


Figura 2. Espectro eletromagnético.

Folhas verdes das plantas geralmente demonstram baixa reflectância e transmitância na região do espectro visível devido à elevada absorptância pelos pigmentos fotossintéticos das plantas (CHAPPELE et al., 1992). Assim como ocorre pouca absorptância do infravermelho próximo pelos pigmentos e partículas celulares, gerando elevados níveis de reflectância e transmitância (SLATON et al., 2001).

A vegetação apresenta características importantes dentro do espectro eletromagnético. A clorofila absorve a radiação na região do vermelho (680 nm) e do azul (510 nm) e a resposta de reflectância da vegetação saudável é próxima de 700 nm. A faixa de infravermelho próximo situa-se entre 700 e 1300 nm, sendo que as folhas, geralmente, refletem entre 40% e 60%. Aproximadamente 5% é absorvido e o restante pertence à transmitância (THENKABAIL et al., 2012).

O comportamento espectral dos alvos é de grande utilidade para avaliação do vigor das plantas, como observado na Figura 3. As mudanças decorrentes de estresse ou da senescência acabam resultando em maior reflexão da luz na região do vermelho e maior absorção do infravermelho. Plantas saudáveis demonstram altos valores de reflectância na região do infravermelho e baixos valores na região do vermelho (PINTER et al., 2003).

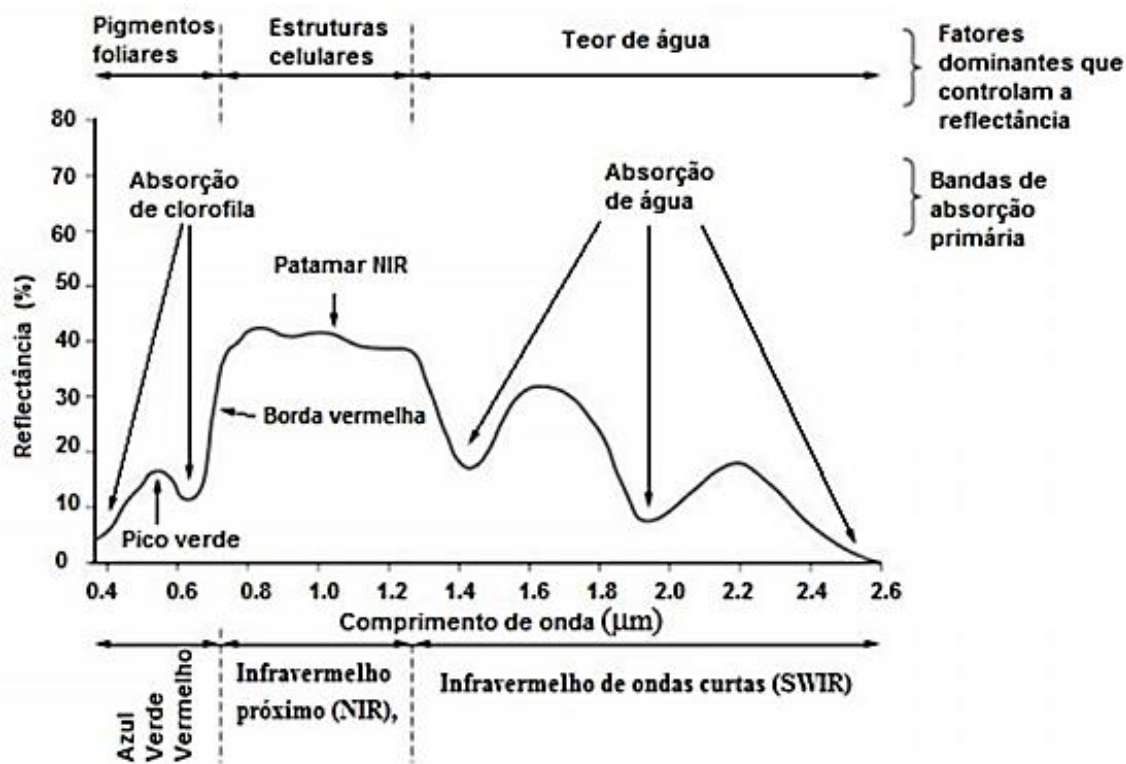


Figura 3. Faixas de absorção e fatores que controlam a reflectância.

Imagens térmicas também podem ser usadas para determinar o estresse hídrico em culturas, quantificando-se a temperatura das folhas, que possuem relação com a condutância foliar (MOLLER, 2007).

Leinonen e Jones (2004) demonstraram que imagens térmicas, em conjunto com imagens do espectro visível e infravermelho, evidenciam o dossel das culturas estudadas, auxiliando em estimativas de temperatura e estresse hídrico.

Dessa forma, imagens de satélite são boas alternativas para a amostragem em campo, sendo um método não destrutivo e fornecendo uma grande cobertura espacial (SEPULCRE-CANTÓ et al., 2006).

4.2.3 Satélite Landsat 8

A partir do espaço é possível averiguar recursos e fenômenos terrestres utilizando-se imagens providas em diversos comprimentos de ondas, frequências temporais e resoluções espaciais (BARBOSA, 2009).

A agência Espacial Americana desenvolveu, no final da década de 60, um projeto chamado de *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT), voltado à observação de recursos terrestres (BATISTELLA et al., 2004). Em 11 de fevereiro de 2013 foi lançado ao espaço a Missão de Continuidade dos Dados Landsat (LDCM) – com o nome de Landsat 8 (NASA, 2013). Este satélite possui novos sensores, o sensor espectral OLI (*Operational Land Imager*) e o sensor termal TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), com diversas melhorias e novidades aos usuários de imagens em mesoescala, como é observado na Tabela 2.

Os sensores multiespectrais registram simultaneamente vários intervalos do espectro, produzindo imagens da mesma cena. Essas imagens multiespectrais aumentam a possibilidade de extrair informações de alvos, como objetos ou superfícies, pois permitem a análise do comportamento espectral em diversas bandas do espectro (NOGUCHI, 2004).

Segundo Moreira (2001), a amplitude da radiância advinda de alvos imageados é diferente de uma banda para outra. Isso ocorre pela interação da radiação eletromagnética com o alvo.

Tabela 2. Características do satélite Landsat 8

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
OLI (Operational Land Imager)	(B1) Costal	0,433 – 0,453	30	16 dias	185 km	12 bits
	(B2) Azul	0,450 – 0,515				
	(B3) Verde	0,525 – 0,600				
	(B4) Vermelho	0,630 – 0,680				
	(B5) Infravermelho próximo	0,845 – 0,885				
	(B6) Infravermelho médio	1,560 – 1,660				
	(B7) Infravermelho médio	2,100 – 2,300				
	(B8) Pancromático	0,500 – 0,680				
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	(B9) Cirrus	1,360 – 1390	30	100		
	(B10) LWIR – 1	10,30 – 11,30				
	(B11) LWIR – 2	11,50 – 12,50				

Fonte: USGS, 2016.

A órbita do satélite Landsat 8 é heliossíncrona, com inclinação de aproximadamente 98,2°. A passagem pela linha do equador ocorre, aproximadamente, às 10:00 horas, com altitude de 705 km. A resolução temporal é de 16 dias e o tamanho da imagem é de aproximadamente 170 km de norte a sul e 183 km de leste a oeste (USGS, 2013).

As principais aplicações do Landsat são: monitoramento de áreas de preservação, atualização de mapas, estimativas de biomassa, monitoramento de queimadas, secas e inundações, acompanhamento de áreas de uso agrícola, entre outros (BATISTELLA et al., 2004).

As características dos produtos do Landsat 8 são consistentes com o padrão de Nivel 1 (ortorretificadas). Os dados disponibilizados são os GeoTIFF, que são as bandas e o arquivo de metadados. A resolução radiométrica é de 16 bits, com o Datum WGS 1984, com projeção *Universal Transversa de Mercator* (USGS, 2013).

4.2.4 Índices de Vegetação

Nas aplicações do sensoriamento remoto, Liu (2006) descreveu os índices de vegetação que monitoram e quantificam as condições e distribuições espaciais da vegetação, por meio de dados digitais de reflectância espectral da radiação eletromagnética. Os índices de vegetação são obtidos de combinações matemáticas das reflectâncias em várias faixas espectrais da radiação eletromagnética.

As combinações da reflectância de alvos da superfície em dois ou mais comprimentos de onda, especialmente na região do visível e infravermelho, são chamadas de índices de vegetação, cujo objetivo é destacar uma propriedade particular da vegetação (JENSEN, 2009).

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais, que indicam a atividade da vegetação verde, incluindo o índice de área foliar (IAF), a porcentagem de cobertura verde, o teor de clorofila, a biomassa verde e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2009).

Estes índices estão relacionados aos parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como a biomassa, além dos efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, que influenciam os valores de reflectância da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Segundo Uno (2005), vários índices foram desenvolvidos para analisar as condições das culturas na agricultura. Técnicas de realce da imagem com índices de vegetação proporcionam um aumento na resposta de áreas vegetadas, aprimorando a aparência da distribuição espacial das informações da imagem, o que resulta em simplificada interpretação computacional e visual.

Definido por Rouse et al. (1974), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) é um dos índices mais antigos e conhecidos. Em sua constituição, utiliza-se a diferença normalizada das regiões de alta absorção e reflectância da clorofila, tornando-o robusto em uma grande variedade de condições. Este índice é resultante da razão entre a combinação das bandas da região do vermelho (v) e do infravermelho próximo (ivp). Este índice varia entre os valores de -1 até +1, representado pela Equação 1:

$$NDVI = \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(\rho_{ivp} + \rho_v)} \quad (1)$$

onde: ρ_{ivp} é a reflectância da faixa de infravermelho próximo (0,85 a 0,88 μm);
 ρ_v é a reflectância na faixa do vermelho (0,64 a 0,67 μm).

Com o aumento da cobertura vegetal, a reflectância na região do vermelho tende a diminuir, enquanto que no infravermelho próximo tende a aumentar, devido às propriedades espectrais contrastantes de vegetação, solo e sombras (ROUSE et al., 1974).

Valores negativos resultantes deste índice representam nuvens, valores próximos de zero representam solo nu ou sem vegetação, e valores maiores que zero demonstram presença de vegetação. Quanto maiores os valores deste índice, mais densa é a vegetação, ou a vegetação está em pleno vigor de crescimento (LIU, 2006).

Outro índice de relativa importância é o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), proposto por Huete (1988), que foi adaptado do NDVI para minimizar efeitos do solo, incorporando uma constante para este ajuste, que é calculado pela Equação 2:

$$SAVI = \frac{(1+L_s)(\rho_{ivp}-\rho_v)}{(L_s+\rho_{ivp}+\rho_v)} \quad (2)$$

onde: L_s é a constante de ajuste, que pode variar de 0 a 1, segundo a cobertura de solo presente na área. Ponzoni e Shimabukuro (2010) descrevem valores ótimos como 1 para baixas densidades de vegetação, 0,5 para densidades médias de vegetação e 0 para áreas altamente vegetadas.

Diversas modificações na formulação ocorreram com este índice, como descrito por Qi et al. (1994), para que os ruídos e interferências do solo fossem melhor descritos, até que se chegou ao Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado 2 (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2* – MSAVI2), que é formulado pela Equação 3:

$$MSAVI2 = \frac{2\rho_{ivp}+1-\sqrt{(2\rho_{ivp}+1)^2-8(\rho_{ivp}-\rho_v)}}{2} \quad (3)$$

Ponzoni e Shimabukuro (2007) citaram o Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index* – EVI) como um índice desenvolvido para

aprimorar a resposta da vegetação, propiciando melhoras na sensibilidade de detecção de biomassa, reduzindo a influência do solo e da atmosfera, como visto na Equação 4:

$$EVI = G\left(\frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + (C1\rho_v) - (C2\rho_{Azul}) + L}\right) \quad (4)$$

onde: ρ_{Azul} é o fator de reflectância na banda do azul; C1 e C2 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera para as bandas do vermelho e azul, sendo respectivamente 6 e 7,5; L é o fator de ajuste do solo, considerado 1 e G é o fator de ganho, utilizado como 2,5. Todos esses valores são definidos pelo autor para a melhor performance da equação.

A cana-de-açúcar apresenta altos valores de índices de vegetação no período de crescimento, entretanto esses valores decaem quando a cultura se aproxima do período de senescência. Rudorff (1985) descreveu que a partir dos dados obtidos pelo satélite Landsat, fatores como produtividade em cana-de-açúcar podem ser expressados por meio de índices de vegetação.

4.3 Índices de vegetação e produtividade

A correlação entre os parâmetros biofísicos das culturas e o sensoriamento remoto, podem ser realizadas por meio de índices de vegetação ou de bandas simples, dessa forma, os índices de vegetação são rotineiramente utilizados para aferir parâmetros das culturas (GATES et al., 1965).

Diversos autores correlacionaram a produtividade de lavouras com índices de vegetação. Picoli et al. (2009) demonstraram resultados promissores quando relacionaram variáveis espectrais com as estimativas de produtividade para a cana-de-açúcar. Assim como Rizzi e Rudorff (2007) encontraram indícios de relações entre índices de vegetação e produtividade de soja no estado do Rio Grande do Sul, ao utilizar o NDVI. Diker et al. (1998) além de encontrarem correlações entre índices e produtividade, o complementaram ao encontrarem boas correlações com os parâmetros como matéria seca e índice de área foliar. Monteiro et al. (2013) observaram diversos índices de vegetação, como: razão simples, índice de vegetação ajustado ao solo, índice de vegetação realçado, o índice de vegetação por diferença normalizada e o índice de vegetação de área foliar, como sendo aceitáveis parâmetros para estimar a produtividade da cultura do feijoeiro.

Também, fazendo o uso de imagens espectrais, Steven e Millar (1997) verificaram que alguns índices como o NDVI demonstram ótimas correlações com produtividade de trigo. E Rudorff (1985) comprova o potencial da utilização de informações do projeto Landsat na estimativa de produtividade com o uso de índices de vegetação, e com isso, conseguiu resultados adequados nas regressões lineares entre essas informações.

Simões et al. (2005) encontraram correlações maiores que 0,79 em índices como o RVI (Índice de Vegetação da Razão), NDVI e SAVI em um estudo realizado em cana-de-açúcar acompanhando apenas uma variedade em duas safras consecutivas. Os índices como o SR (Razão Simples), o NDVI e o SAVI demonstraram aumento em seus valores até o final da fase de crescimento vegetativo, a partir do qual os valores se estabilizaram e diminuíram devido a entrada da fase de maturação. E o RVI apresentou queda em seus valores desde o início do ciclo, com a estabilização em função do aumento da quantidade de palha e da diminuição de biomassa foliar.

Fernandes et al. (2011), realizaram um experimento em 20 municípios do estado de São Paulo, utilizando o sensor *SPOT Vegetation* durante sete safras, e observaram resultados significativos relacionando o NDVI com a metodologia de árvore de decisão. Concluíram que o monitoramento de áreas canavieiras permite inferir sobre as tendências de produtividade média da cultura.

Mas, diversos avanços são esperados no uso de imagens orbitais para estimativas de produtividade agrícola e modelos agronômicos (PICOLI et al, 2009).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo pertence aos municípios de Lençóis Paulista e Pratânia, no estado de São Paulo, e está localizada dentro do setor operacional da Agrícola Rio Claro, que é parceira na produção de cana-de-açúcar vinculada à unidade Usina Barra Grande pertencente ao grupo Zilor.

Situa-se entre as coordenadas planas, relativas ao fuso 22, de latitude $22^{\circ} 38' 33.14''$ S a $22^{\circ} 48' 47.20''$ S e longitudes de $48^{\circ} 45' 0.46''$ W a $48^{\circ} 52' 10.96''$ W de Gr., com altitudes variando entre 600 e 700 m. Apresenta uma área total de 5.922,34 hectares (Figura 4).

A área localiza-se sobre a morfoestrutura do Planalto Ocidental Paulista, mais especificamente ao Planalto Centro Ocidental que se constitui de topos aplainados ou tabulares e altimetrias variando de 400 a 700 m (ROSS; MOROZ, 1997).

Os solos predominantes dos municípios são das classes registradas pelo mapa pedológico do estado de São Paulo e, são do tipo LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, LATOSSOLO AMARELO Distrófico e nas áreas de maior declividade, próximo dos cursos d'água, o ARGISSOLO VERMELHO Distrófico.

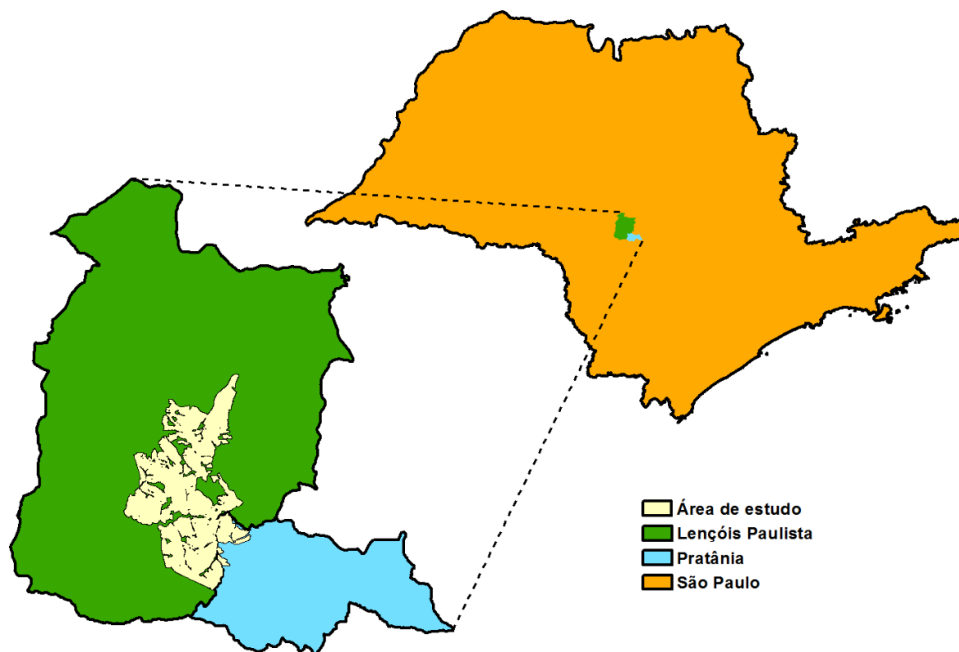


Figura 4. Localização da área de estudo.

O clima da região de Lençóis Paulista, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Aw, clima tropical com estação seca de inverno, e a temperatura média do mês mais quente é aproximadamente 24,7 °C e a do mais frio 18,1 °C. Pratânia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, designado como clima temperado úmido com inverno seco e verão quente, com a temperatura média do mês mais quente sendo aproximadamente 23,1° C e do mês mais frio 17,1° C (CEPAGRI, 2015).

5.2 Material

5.2.1 Programas para processamento de dados

O Sistema de Informações Geográficas - ARCGis foi utilizado no processamento das informações, georreferenciamento, composição de bandas, conversão de dados, avaliação, análises e elaboração de mapas. Assim como o programa Microsoft Excel foi utilizado para a produção das regressões lineares múltiplas.

5.2.2 Cartas topográficas

Para a caracterização do relevo da área de estudo, foram utilizadas cartas planialtimétricas (Tabela 3) com a escala de 1:10000 e equidistância vertical entre as curvas de nível de cinco metros, editadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), datadas de 1978.

Tabela 3. Articulações das cartas topográficas do IGC para área de estudo

Cartas do IGC	
Nome da folha	Articulação
Lençóis Paulista IV	069/071
Ribeirão da Prata	070/071
Boqueirão	071/070
Córrego Pirapetinga	071/071
Fazenda Rocleivan	072/070
Vargem Limpa	072/071
<i>Obtido no portal IGC</i>	073/070
Fazenda Zilo	073/071
<i>Obtido no portal IGC</i>	074/070
Fazenda Icaraí	074/071

As informações das cartas 073/070 e 074/070 foram obtidas no endereço: <http://geoportal.igc.sp.gov.br:8080/GeoPortalIGC/Internet/>, sendo este um portal para acesso a informações de produtos do IGC, e nele é possível ter acesso a cartas e aos recortes.

5.2.3 Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens multiespectrais do Sensor *Operational Land Imager* – OLI, embarcado no satélite Landsat 8 com resolução espacial de 30 metros. A aquisição das imagens foi realizada de forma gratuita pelo portal Earth Explorer, no endereço eletrônico <http://earthexplorer.usgs.gov>.

As imagens referentes à área de estudo estão referenciadas na órbita 221 e ponto 076, relacionadas com as datas de passagem, conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 4. Datas de passagem das imagens do satélite LANDSAT 8 que foram utilizadas no trabalho

Data de passagem	Sensor/Satélite	Bandas (OLI)
11/11/2013		
04/12/2013		
05/01/2014		
30/01/2014		
06/02/2014		
10/03/2014		
11/04/2014		
27/04/2014		
13/05/2014		
29/05/2014	OLI/LANSAT-8	2, 4 e 5
14/06/2014		
16/07/2014		
01/08/2014		
02/09/2014		
11/09/2014		
18/09/2014		
04/10/2014		
13/10/2014		
29/10/2014		
16/12/2014		

As imagens foram escolhidas levando-se em consideração a data de colheita dos talhões de cana-de-açúcar e foram analisadas do período de colheita até seis meses antes da data de cada colheita.

5.3 Metodologia

O desenvolvimento do trabalho se deu pela aquisição da base de dados, na forma de planilhas, correspondentes a produtividade para a safra de 2014 dos talhões da cana-de-açúcar, que foram fornecidas pela Agrícola Rio Claro, parceiro do grupo Zilor, unidade Usina da Barra Grande.

Compreende-se como área de estudo o total de 5.922,34 ha, o qual é subdividido em talhões, como está demonstrado na Figura 5. Além disso, a legenda descreve a divisão das áreas por período de colheita, a qual foi definida pela disponibilidade de imagens, sendo estas usadas para a análise e posterior modelagem.

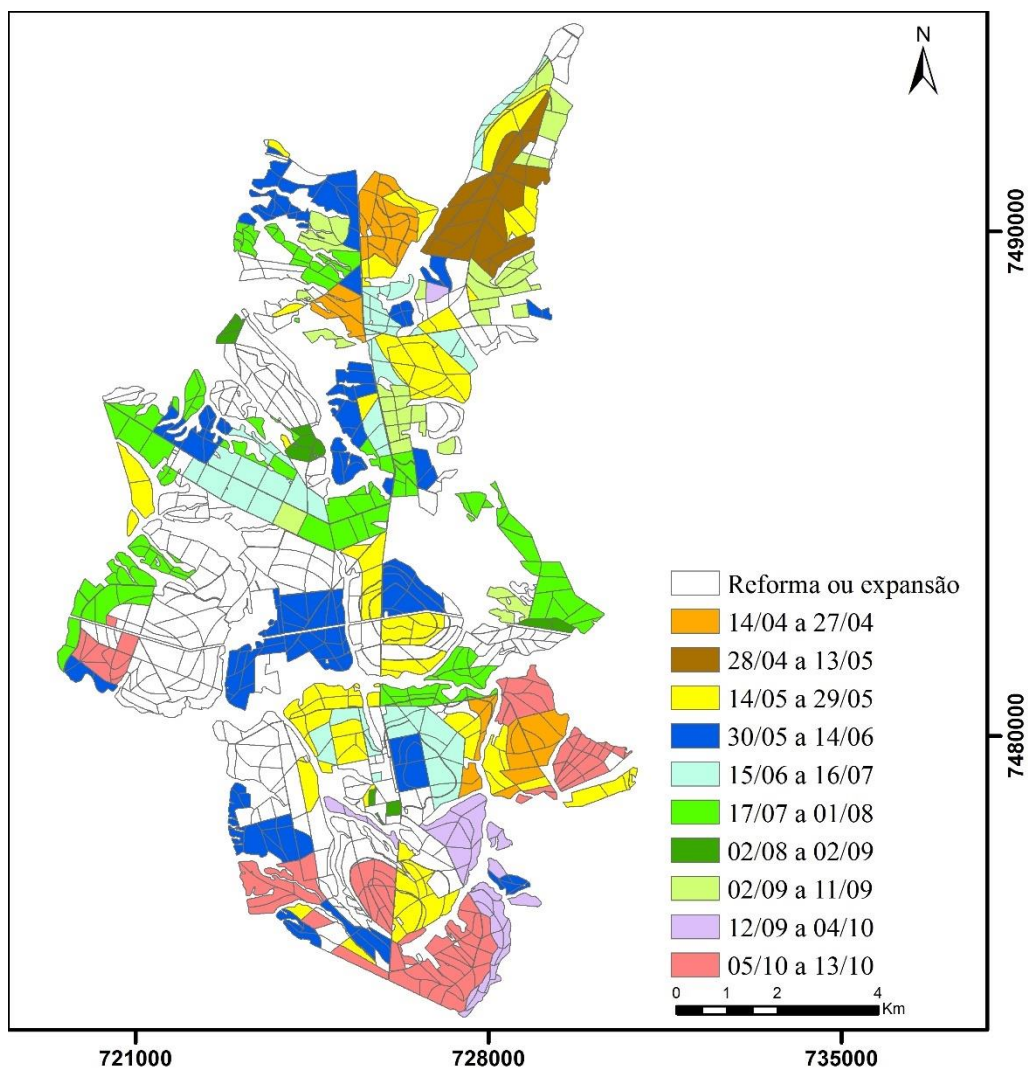


Figura 5. Talhões de cana-de-açúcar e as respectivas datas de correlação com as imagens.

Uma das ferramentas utilizadas que permitiu a elaboração dos resultados finais foram técnicas de geoprocessamento com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o ArcGIS, para a realização do processamento de uma base de dados georreferenciada e o mapeamento da área.

Para o georreferenciamento da base de dados utilizada para a área de estudo foi adotada o sistema de coordenadas planas, projeção Universal Transversa de Mercator - UTM, com o Datum SIRGAS 2000, fuso 22 S.

Os dados de produtividade foram utilizados para a realização de correlações e regressões com os dados dos índices de vegetação oriundos das imagens de satélites.

5.3.1 Processamento das imagens

As imagens disponibilizadas no portal Earth Explorer já possuem correção atmosférica, realizada por meio do algoritmo L8SR desenvolvido pela NASA (USGS, 2015), onde os pixels das imagens estão apresentados com valores de reflectância de superfície, tendo assim, um significado físico, necessário para a obtenção de índices de vegetação (PONZONI et al., 2012).

Visando minimizar os efeitos do relevo sobre os valores de reflectância, foi aplicado a cada uma das bandas, o algoritmo de correção topográfica denominado correção C, desenvolvido por Teillet et al. (1982), conforme a Equação 5.

$$\rho_h = \rho_T \left(\frac{\cos \theta_z + c}{\cos i + c} \right) \quad (5)$$

onde: c é a constante derivada a partir da relação linear entre a reflectância espectral (ρ_T) e o cosseno do ângulo de incidência solar ($\cos i$).

A constante c é obtida para cada banda pela divisão entre o coeficiente linear ou intercepto (b) e o coeficiente angular (m) (Equação 6) da regressão linear entre ρ_T (y) e $\cos i$ (x), descrito na Equação 7 (LIMA; RIBEIRO, 2014).

$$C = \frac{b}{m} \quad (6)$$

$$\rho_T = m \cos i + b \quad (7)$$

Para obtenção do $\cos i$ foi utilizado um modelo digital de elevação (MDE) que foi produzido utilizando-se das cotas planialtimétricas presentes nas cartas topográficas do IGC. O MDE permite a obtenção de informações como declividade e orientação de encostas, necessários para o cálculo do ângulo local de incidência solar

(LIMA; RIBEIRO, 2014). Os parâmetros para a aplicação da correção C estão apresentados na Tabela 5.

O ângulo de elevação solar foi calculado pela Equação 8 a partir do ângulo solar zenital e do azimute solar.

$$90 - \theta_z = \hat{\text{Ângulo de elevação solar}} \quad (8)$$

onde: θ_z representa o ângulo solar zenital.

Tabela 5. Parâmetros que foram utilizados na correção topográfica

Data	Ângulo Solar Zenital (θ_z)	Ângulo de Elevação Solar	Ângulo Azimutal Solar (θ_n)
11/11/13	24,947533	65,052467	82,254982
04/12/13	25,439133	64,560867	93,906631
30/01/14	31,777348	58,222652	86,491417
06/02/14	32,573734	57,426266	82,918976
10/03/14	36,965645	53,034355	64,077934
11/04/14	43,404617	46,595383	47,204529
27/04/14	47,062145	42,937855	41,302307
14/06/14	54,966900	35,033100	34,786297
16/07/14	54,142239	35,857761	37,481800
01/08/14	51,503651	38,496349	40,115295
02/09/14	42,747166	47,252834	47,444748
11/09/14	39,801743	50,198257	50,156212
18/09/14	37,483395	52,516605	52,563335
04/10/14	32,424484	57,575516	59,312679
29/10/14	26,639938	63,360062	73,836601
16/12/14	26,871181	63,128819	96,581779

Posteriormente à correção topográfica, foram realizados os cálculos dos índices de vegetação NDVI, EVI e MSAVI2 para todos os talhões da área de estudo.

Realizou-se o cálculo do valor médio de NDVI, MSAVI2 e EVI, dos pixels dentro da área dos talhões, permitindo a obtenção dos valores médios dos índices de vegetação que foram relacionados com os valores de produtividade observados em campo. A produtividade real média de cada talhão foi determinado diretamente por meio da pesagem na ocasião da colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

No caso do sensor OLI do Landsat 8, para a construção dos índices, foram utilizadas as bandas 2, 4 e 5, as quais correspondem aos comprimentos de onda do azul, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente.

5.3.2 Correlações

Foi realizada a correlação entre os valores de produtividade observados em campo e os valores dos índices de vegetação, pixel a pixel, em cenas obtidas dos seis meses anteriores à colheita.

Como a correlação é uma relação entre duas variáveis medidas em um certo número de indivíduos, foram inseridos dados em um diagrama de dispersão com eixos cartesianos onde os pontos deverão alinhar-se em uma reta. Com isso, é dito que possuem relação linear e é possível a produção de uma equação linear, o que é apropriado para a análise de correlação entre duas variáveis, estimando-se uma variável em relação a outra (LANDIM, 1998).

Os valores do resultado da correlação são adimensionais, variando entre -1 e +1, que é totalmente inverso ou totalmente direto, respectivamente. Valores próximos de zero significam que não há relação linear entre as duas variáveis.

As imagens que apresentaram os maiores valores de correlação foram selecionadas para a modelagem da produtividade.

5.3.3 Regressão linear múltipla

Para a obtenção do modelo matemático que descreveu a produtividade da cana-de-açúcar foi utilizado o método de regressão linear múltipla.

A definição de regressão linear múltipla tem sido largamente difundida e aplicada em diversas espécies vegetais, com o objetivo de estimar informações de produção ou colheita como no estudo com cana-de-açúcar desenvolvido por Scarpari e Beuclair (2009), como é o caso de Le Bail et al. (2005) com trigo e com Soler (2007) em milho.

Foi utilizado modelo proposto por Montgomery et al. (2001), onde a regressão linear múltipla é representada, com n variáveis, pela Equação 9.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (9)$$

onde: β_0 é chamado de coeficiente de intercepto, que corresponde à média de Y quando as outras variáveis são iguais a zero, e os coeficientes β_1 até β_n são os coeficientes de regressão parciais.

Deve-se levar em conta que, segundo Landim (2011), embora a regressão múltipla seja multivariada, no sentido de que mais de uma variável é medida simultaneamente em cada observação, trata-se de uma técnica univariada, pois o enfoque é a dispersão da variável dependente Y .

Então, a proporção de variância de Y explicada pela equação de regressão linear múltipla é representada pelo coeficiente de determinação R^2 (Equação 10).

$$R^2 = \frac{\text{variância de } Y \text{ explicada pela análise de regressão}}{\text{variância total}} \quad (10)$$

Sendo que os valores de R^2 apresentam-se no intervalo de 0 até 1, fornecendo uma medida dimensional de quantidade do ajuste do modelo aos dados. Deve-se verificar, que se o coeficiente de determinação R^2 for próximo de 1, mostrando que as variáveis medidas são responsáveis quase que plenamente pela variabilidade de Y (LANDIM, 1998).

Para a produção das regressões foram utilizados os valores dos índices de vegetação NDVI, EVI e MSAVI2, que apresentaram as maiores correlações com a produtividade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram discriminados por período de colheita e os índices de vegetação foram elaborados em cenas que apresentaram maior correlação com a produtividade, sendo que essas imagens foram adquiridas em períodos distintos para cada mês, de um a seis meses antes da colheita.

6.1 Colheita de 14 a 27 de abril

Na Figura 6 encontra-se evidenciado os talhões colhidos no período de 14 a 27 de abril de 2014, observa-se que os talhões estão aglomerados em dois blocos, distribuídos longitudinalmente na área de estudo.

Em empresas produtoras de cana-de-açúcar, o cronograma de colheita é elaborado levando-se em conta a maturação da cana-de-açúcar, a meteorologia, o tipo de solo e a precocidade da variedade.

Observa-se na Figura 7, a distribuição da média das correlações dos índices de vegetação nos seis meses anteriores à data final da colheita e foi escolhida como referência a data cujos valores são mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices), a qual corresponde à cena do dia 5 de janeiro de 2014.



Figura 6. Talhões colhidos entre 14 e 27 de abril.

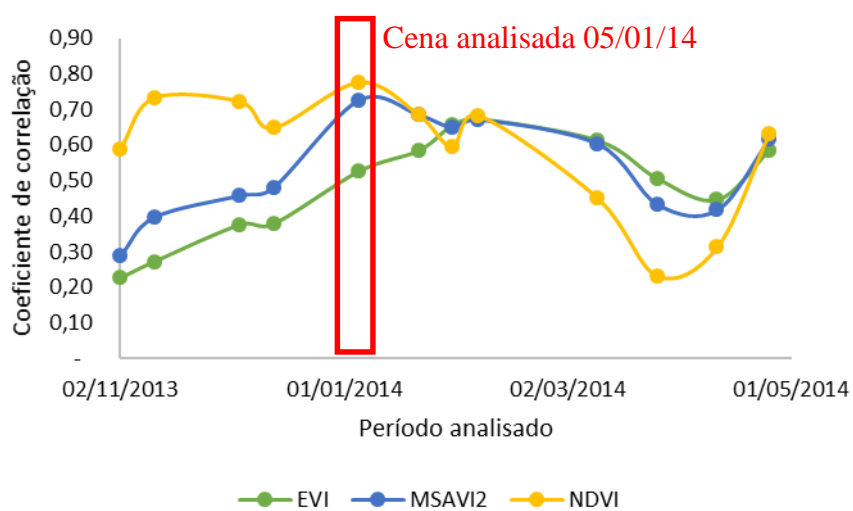


Figura 7. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 02/11/2013 e 25/04/2014.

Dos três índices de vegetação avaliados, o NDVI foi o que apresentou o maior valor nessa data, seguido do MSAVI2 e do EVI.

Na Tabela 6 verificou-se os valores de produtividade e os valores das médias dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI que correspondem ao dia 5 de janeiro de 2014, quando os índices apresentaram as maiores correlações.

Tabela 6. Produtividade e índices de vegetação em 5 de janeiro de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
64,37	0,5522	0,3995	0,6125
81,78	0,5693	0,4794	0,7547
82,54	0,5693	0,4821	0,7631
82,80	0,6517	0,5599	0,8035
86,38	0,5365	0,4336	0,6881
90,05	0,6056	0,5095	0,7518
95,33	0,6535	0,5702	0,8142

O NDVI apresentou os maiores valores quando comparado com os outros índices, ressaltando que a amplitude dos índices são as mesmas.

A correlação entre a produtividade e o EVI foi de 0,53, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,73 e entre a produtividade e o NDVI de 0,78.

6.2 Colheita de 28 de abril a 13 de maio

Na Figura 8 estão representados os talhões colhidos de 28 de abril a 13 de maio. Observa-se que os talhões estão aglomerados em apenas um bloco, localizado na região norte da área experimental.

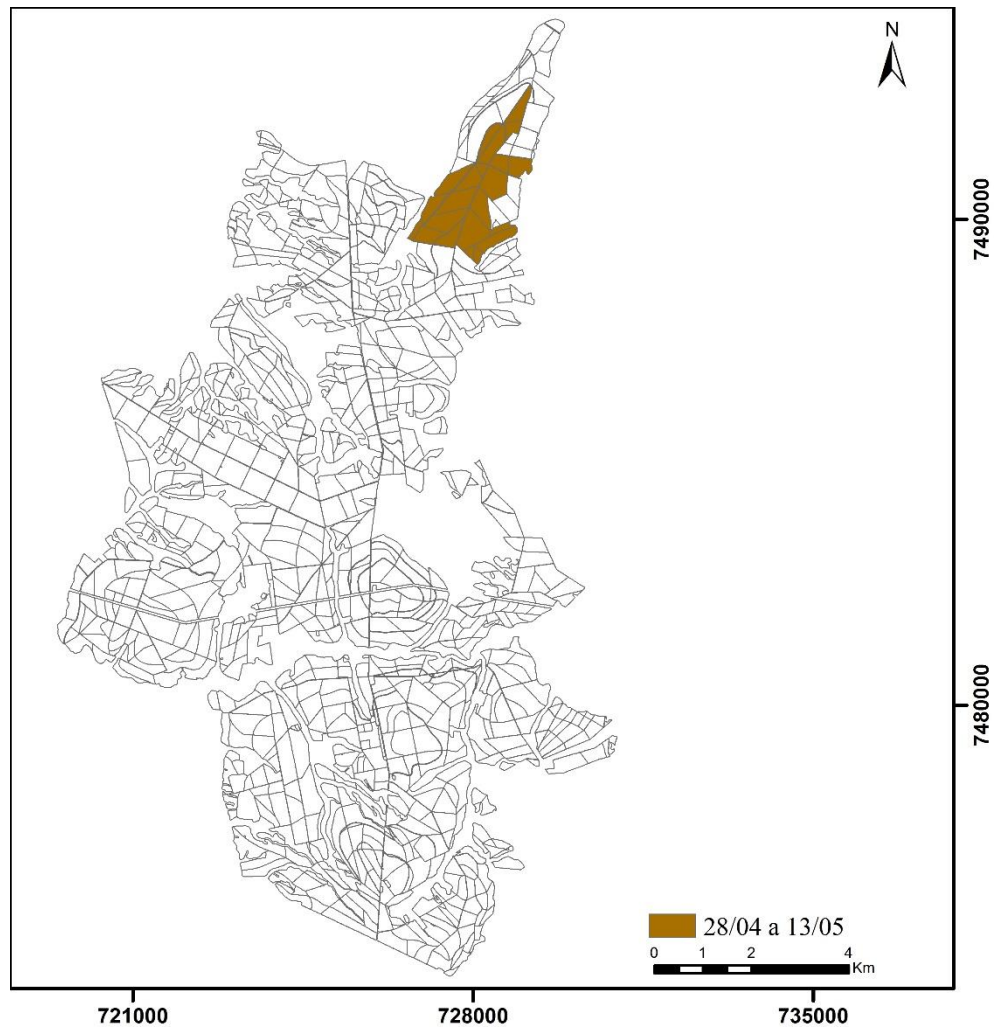


Figura 8. Talhões colhidos entre 28 de abril e 13 de maio.

Está representada na Figura 9 a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 6 de fevereiro de 2014.

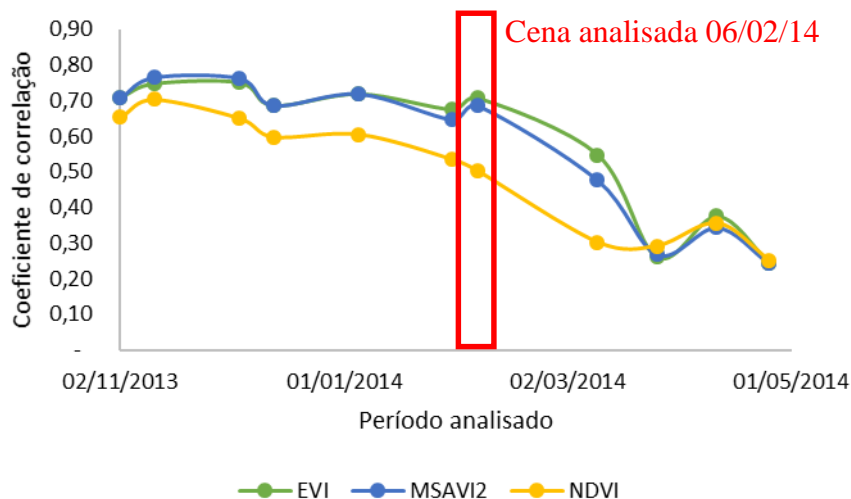


Figura 9. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 02/11/2013 e 13/05/2014.

Observou-se que o EVI apresentou o maior valor de média, logo seguido do MSAVI2, e o NDVI foi o índice que a média mais se distanciou do grupo.

A Tabela 7 representa os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 6 de fevereiro de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

Tabela 7. Produtividade e índices de vegetação em 6 de fevereiro de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
81,55	0,5252	0,4315	0,6972
82,34	0,5499	0,4561	0,7196
87,15	0,5759	0,4831	0,7394
87,28	0,4707	0,3736	0,6155
88,73	0,5677	0,4765	0,7398
92,98	0,5692	0,4776	0,7308
93,11	0,5905	0,5009	0,7568
97,18	0,5966	0,4892	0,7171
106,46	0,6043	0,5065	0,7459
107,63	0,5791	0,4781	0,7175
113,43	0,6144	0,5157	0,7502
115,73	0,6116	0,5262	0,7767

A correlação entre os valores de produtividade e o EVI foi de 0,71, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,69 e entre a produtividade e o NDVI de 0,50.

Observa-se que o NDVI apresentou os maiores valores de correlação, seguido do EVI e com menor correlação o MSAVI2.

6.3 Colheita de 14 a 29 de maio

Na Figura 10 estão demonstrados os talhões colhidos entre 14 a 29 de maio de 2014. Pode-se observar ainda que os talhões colhidos estão espalhados por toda área experimental.



Figura 10. Talhões colhidos entre 14 e 29 de maio

Observa-se na Figura 11 a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 4 de dezembro de 2013.

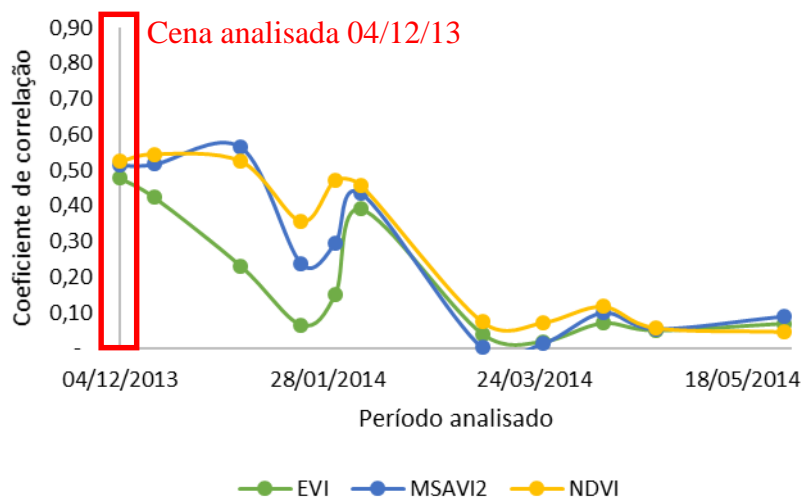


Figura 11. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 04/12/2013 e 29/05/2014.

Tabela 8. Produtividade e índices de vegetação em 4 de dezembro de 2013

Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI	Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
55,58	0,4897	0,3758	0,5706	91,64	0,5202	0,4032	0,6128
60,40	0,5055	0,3961	0,6128	91,75	0,4432	0,3475	0,6144
71,36	0,4571	0,3556	0,5871	92,26	0,5455	0,4365	0,6686
76,49	0,5130	0,4132	0,6585	92,57	0,4450	0,3421	0,5651
78,07	0,4499	0,3404	0,5121	92,63	0,5222	0,4230	0,6740
78,13	0,3815	0,2746	0,4102	96,29	0,4296	0,3189	0,4899
85,93	0,5626	0,4618	0,7086	97,26	0,5003	0,3836	0,5863
86,04	0,5625	0,4485	0,6701	97,37	0,5644	0,4704	0,7341
86,79	0,4546	0,3543	0,5888	97,53	0,5334	0,4098	0,5983
87,69	0,6007	0,5163	0,7729	102,89	0,5105	0,4069	0,6381
88,44	0,5287	0,4232	0,6701	106,67	0,5285	0,4252	0,6520
88,95	0,5143	0,4083	0,6213	107,13	0,5717	0,4724	0,7232
89,03	0,5491	0,4482	0,7026	110,31	0,5386	0,4529	0,7288
89,15	0,4483	0,3437	0,5775	110,82	0,6094	0,5393	0,8124
89,15	0,5956	0,4924	0,7206	115,95	0,5924	0,4923	0,7395
90,05	0,4945	0,4003	0,6540	121,43	0,6062	0,5229	0,7950
90,08	0,5497	0,4504	0,7095	123,16	0,5725	0,4775	0,7388
90,21	0,4441	0,3367	0,5044	123,65	0,5433	0,4462	0,6944
90,74	0,5440	0,4256	0,6425				

É possível observar que os três índices analisado possuem valores muito próximos na data escolhida, apresentando uma difusão nos primeiros meses e voltando a um comportamento suavizado logo em seguida.

Na Tabela 8 estão contidos os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 4 de dezembro de 2013, data em que se apresentaram maiores correlações.

Observa-se que em média, os valores de NDVI são maiores que os valores de EVI e MSAVI2.

A correlação entre a produtividade e o EVI foi de 0,48, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,51 e entre a produtividade e o NDVI de 0,52.

6.4 Colheita de 30 de maio a 14 de junho

Na Figura 12 estão representados os talhões colhidos de 30 de maio a 14 de junho. Observa-se que os talhões estão espalhados por toda área de estudo.

A Figura 13 representa a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 26 de março de 2014.

Nota-se que a cena selecionada para análise possui os maiores valores dos índices de vegetação em todo período e corresponde ao dia 26 de março de 2014.

A Tabela 9 representa os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 26 de março de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

A correlação entre os valores de produtividade e o EVI foi de 0,36, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,37 e entre a produtividade e o NDVI de 0,38.

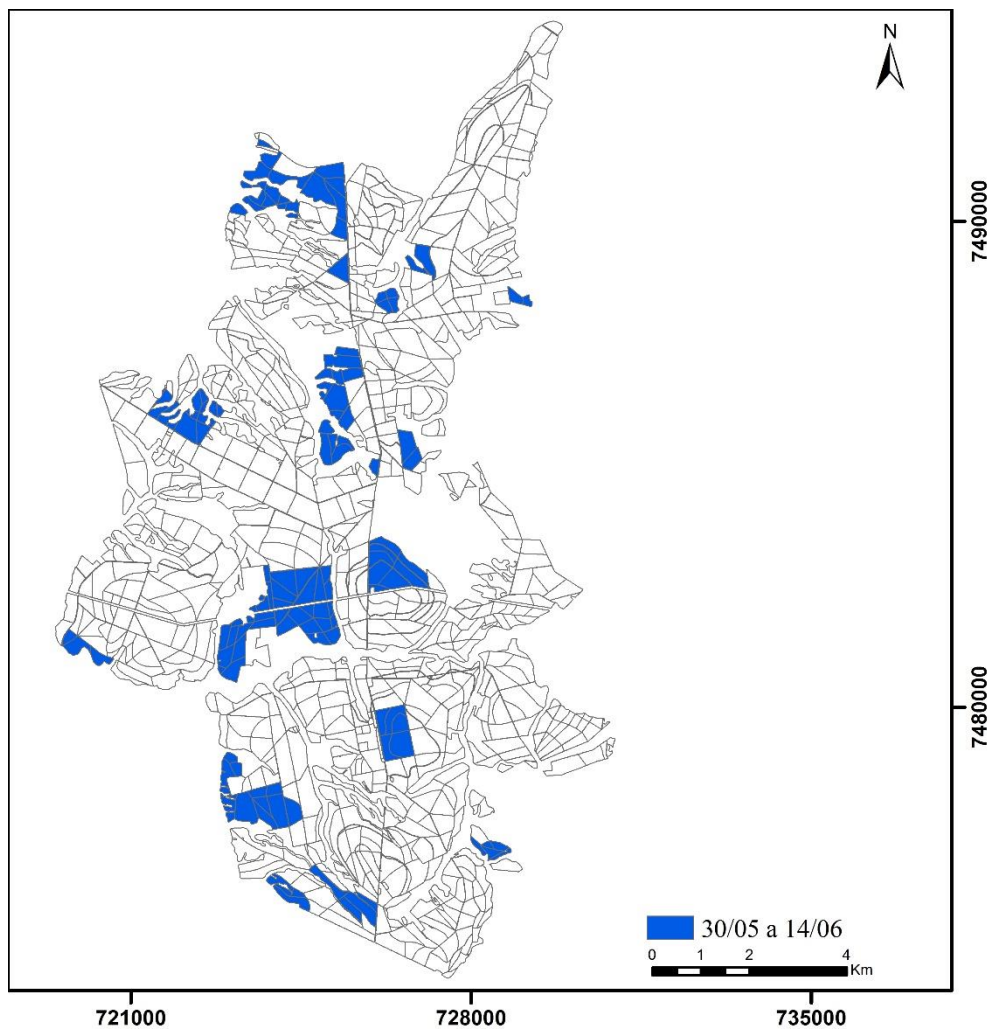


Figura 12. Talhões colhidos entre 30 de maio e 14 de junho.

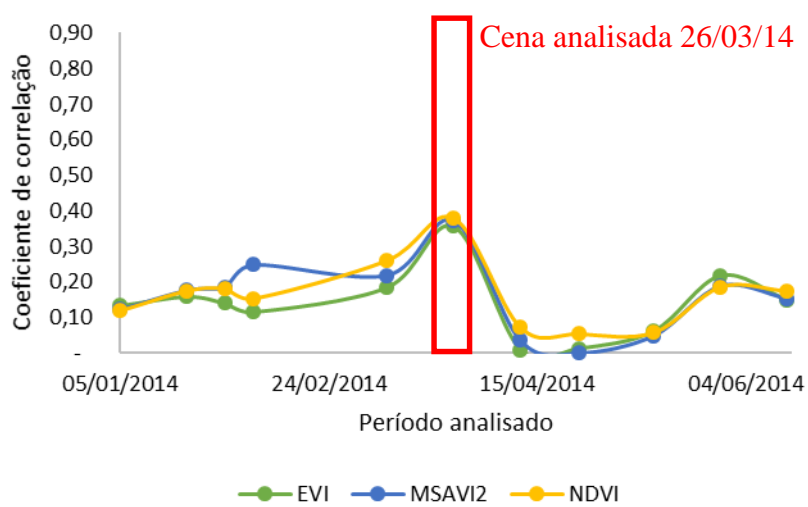


Figura 13. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 05/01/2014 e 14/06/2014.

Tabela 9. Produtividade e índices de vegetação em 26 de março de 2014

Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI	Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
55,15	0,51844	0,41378	0,63392	84,31	0,50703	0,40720	0,64857
59,74	0,51301	0,40193	0,62453	84,56	0,53779	0,44045	0,70509
70,18	0,48964	0,38566	0,61976	84,96	0,58410	0,48410	0,70453
70,42	0,49188	0,38462	0,60746	85,50	0,59326	0,48099	0,70758
75,26	0,52136	0,40400	0,61029	85,78	0,64676	0,53180	0,74471
75,77	0,49173	0,37132	0,56131	86,55	0,61581	0,51835	0,76950
76,59	0,59485	0,49693	0,73829	89,18	0,63402	0,51911	0,73218
76,75	0,69151	0,57657	0,77590	89,94	0,63668	0,54012	0,77306
77,05	0,54577	0,44151	0,68064	91,54	0,59233	0,50055	0,75608
78,24	0,63893	0,54313	0,77517	92,00	0,50388	0,39101	0,59652
80,79	0,58078	0,47813	0,72684	96,29	0,59323	0,48790	0,71796
81,21	0,61383	0,50627	0,73053	96,70	0,58093	0,48107	0,73460
82,31	0,47021	0,33896	0,47096	102,89	0,57929	0,47131	0,69471
82,33	0,55122	0,44743	0,69812	108,32	0,57183	0,47823	0,72534
82,65	0,66467	0,56280	0,77263	108,48	0,62122	0,51806	0,74682

6.5 Colheita de 15 de junho a 16 de julho

Na Figura 14 estão demonstrados os talhões colhidos entre 15 de junho a 16 de julho de 2014. Pode-se observar ainda que os talhões colhidos estão aglomerados em blocos, espalhados longitudinalmente na área experimental.

Constata-se na Figura 15 a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 11 de abril de 2014.

Verifica-se que os índices possuem uma resposta parecida em todo o período, e a seleção da data para análise ocorreu onde os índices demonstravam maior agrupamento.

Na Tabela 10 estão contidos os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 11 de abril de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

A correlação entre a produtividade e o EVI foi de 0,51, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,50 e entre a produtividade e o NDVI de 0,46.

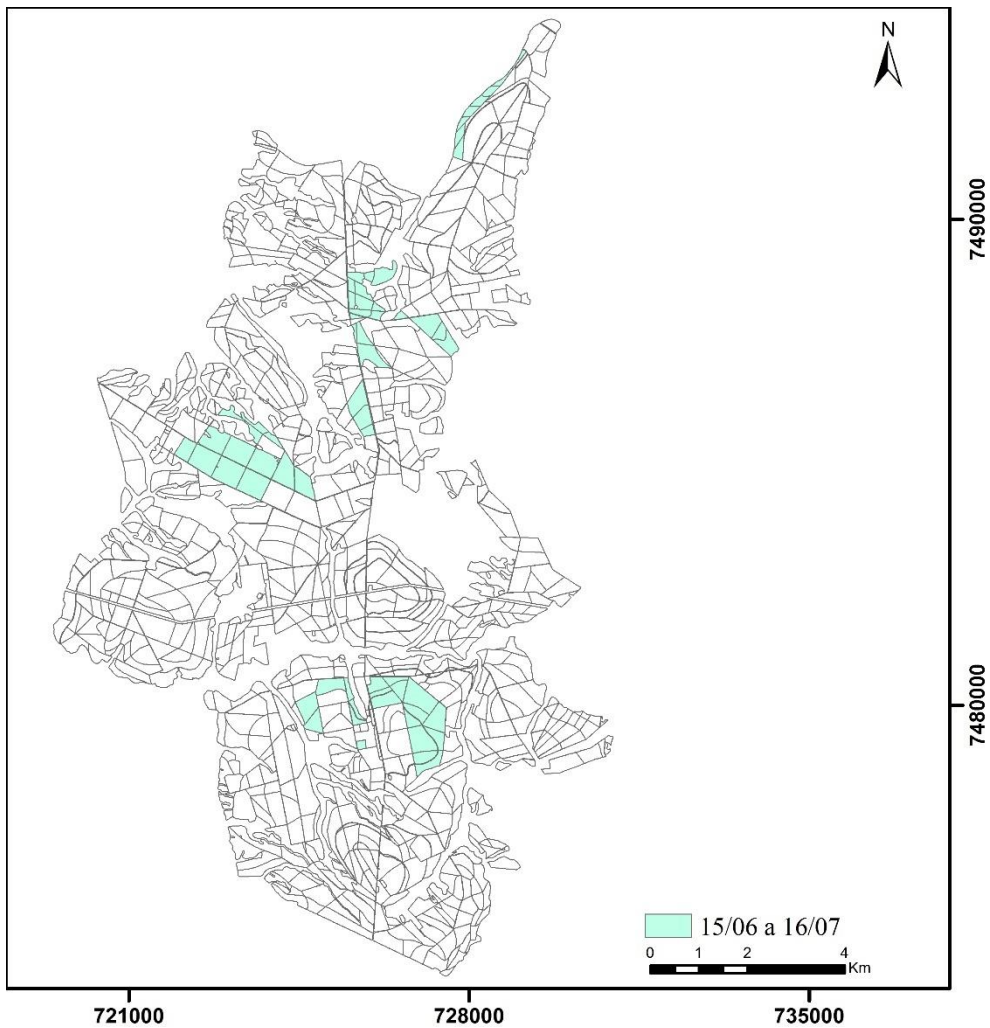


Figura 14. Talhões colhidos entre 15 de junho e 16 de julho.

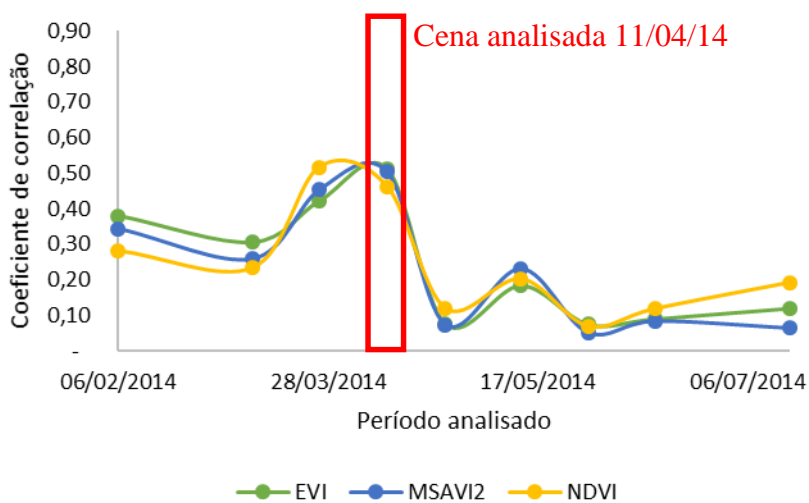


Figura 15. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 06/02/2014 e 16/07/2014.

Tabela 10. Produtividade e índices de vegetação em 11 de abril de 2014

Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI	Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
46,75	0,5184	0,4138	0,6339	83,25	0,6138	0,5063	0,7305
50,58	0,5130	0,4019	0,6245	83,45	0,4702	0,3390	0,4710
54,39	0,4896	0,3857	0,6198	84,16	0,5512	0,4474	0,6981
55,30	0,4919	0,3846	0,6075	92,32	0,6647	0,5628	0,7726
61,16	0,5214	0,4040	0,6103	92,33	0,5070	0,4072	0,6486
63,84	0,4917	0,3713	0,5613	92,34	0,5378	0,4405	0,7051
65,42	0,5949	0,4969	0,7383	92,37	0,5841	0,4841	0,7045
71,47	0,6915	0,5766	0,7759	92,97	0,5933	0,4810	0,7076
74,82	0,5458	0,4415	0,6806	95,53	0,6468	0,5318	0,7447
76,69	0,6389	0,5431	0,7752	97,26	0,6158	0,5183	0,7695
79,14	0,5808	0,4781	0,7268	106,13	0,6340	0,5191	0,7322

6.6 Colheita de 17 de julho a 1 de agosto

Na Figura 16 estão representados os talhões colhidos de 17 de julho a 1 de agosto de 2014. Pode-se observar que os talhões estão aglomerados na porção central da área de estudo.

A Figura 17 representa a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 10 de março de 2014.

Nota-se que os índices possuem um comportamento parecido ao longo do período analisado, onde a data escolhida foi a que apresentou maior agrupamento entre eles.

A Tabela 11 representa os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 10 de março de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

A correlação entre os valores de produtividade e o EVI foi de 0,74, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,79 e entre a produtividade e o NDVI de 0,82.

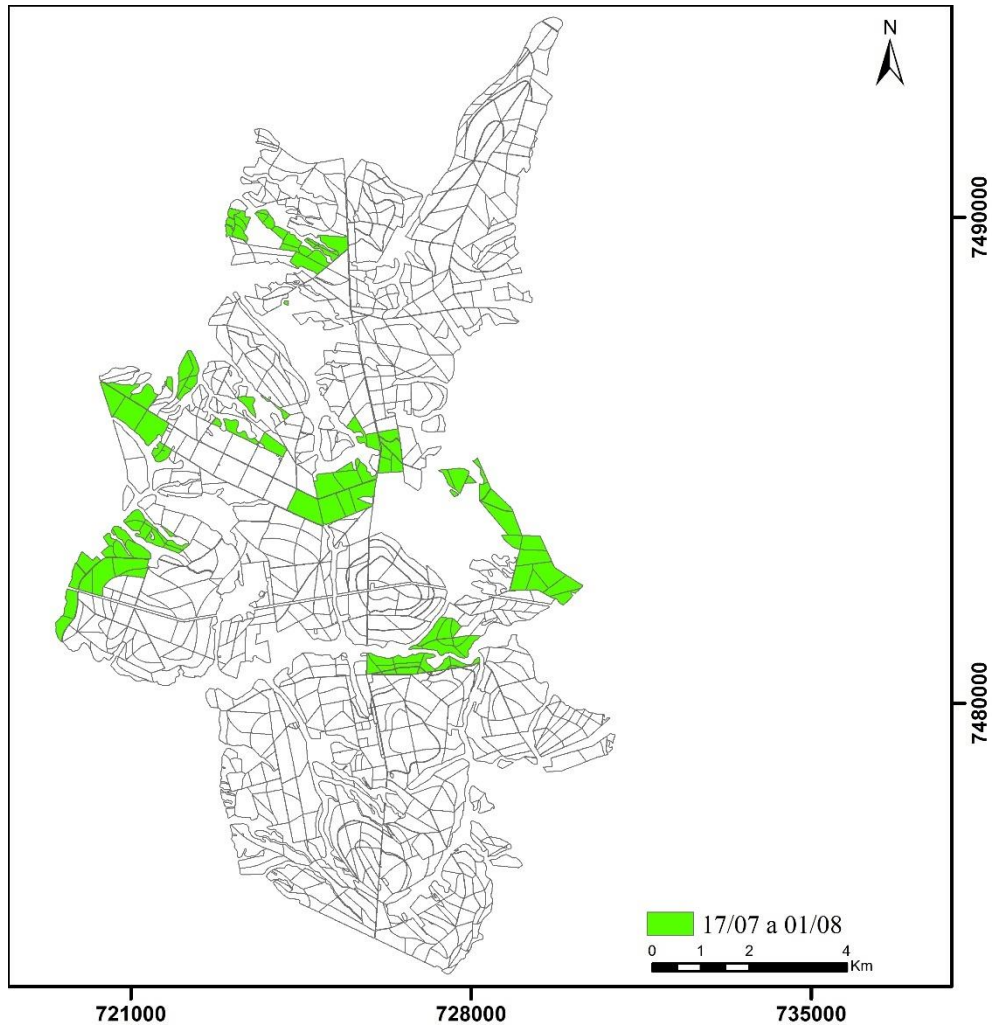


Figura 16. Talhões colhidos entre 17 de julho e 1 de agosto.

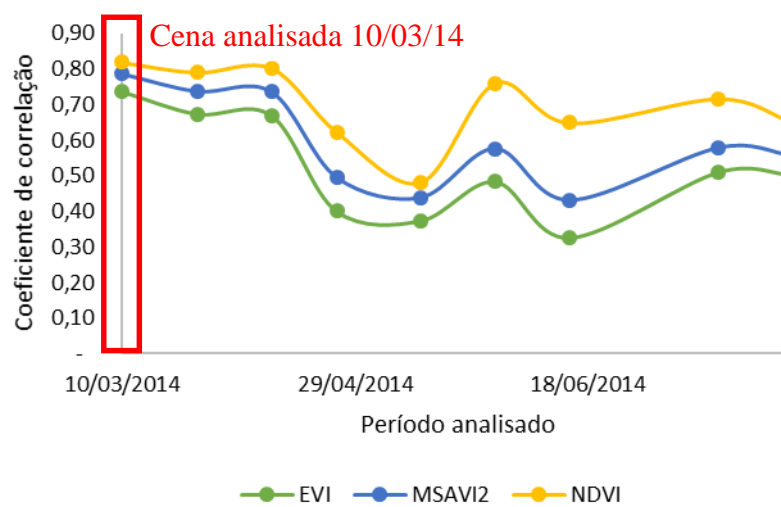


Figura 17. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 10/03/2014 e 01/08/2014.

Tabela 11. Produtividade e índices de vegetação em 10 de março de 2014

Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI	Produção (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
41,21	0,514	0,418	0,684	79,40	0,622	0,540	0,789
48,29	0,543	0,441	0,691	83,16	0,611	0,508	0,738
55,30	0,565	0,477	0,753	83,20	0,593	0,502	0,757
56,97	0,605	0,507	0,747	84,16	0,615	0,527	0,775
63,50	0,551	0,456	0,711	86,73	0,594	0,509	0,771
65,27	0,591	0,506	0,761	87,20	0,601	0,518	0,779
66,16	0,525	0,445	0,739	89,00	0,592	0,500	0,749
66,97	0,564	0,474	0,742	90,38	0,613	0,522	0,768
67,03	0,554	0,472	0,739	91,80	0,563	0,486	0,786
69,05	0,587	0,493	0,740	97,26	0,611	0,524	0,771
73,27	0,580	0,487	0,736	97,28	0,648	0,556	0,779
74,70	0,591	0,497	0,738	97,56	0,682	0,600	0,815
78,33	0,632	0,537	0,766	98,41	0,633	0,555	0,800
78,75	0,625	0,536	0,776				

6.7 Colheita de 2 de agosto a 2 de setembro

Na Figura 18 estão demonstrados os talhões colhidos entre 2 de agosto a 2 de setembro de 2014, pode-se observar que são poucos os talhões colhidos neste período.

Nota-se na Figura 19 a distribuição da correlação dos índices nos seis meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 16 de julho de 2014.

Percebe-se um aumento gradual nos valores de correlação dos índices durante todo o período analisado.

Na Tabela 12 estão contidos os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 16 de julho de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

A correlação entre a produtividade e o EVI foi de 0,86, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,88 e entre a produtividade e o NDVI de 0,88.

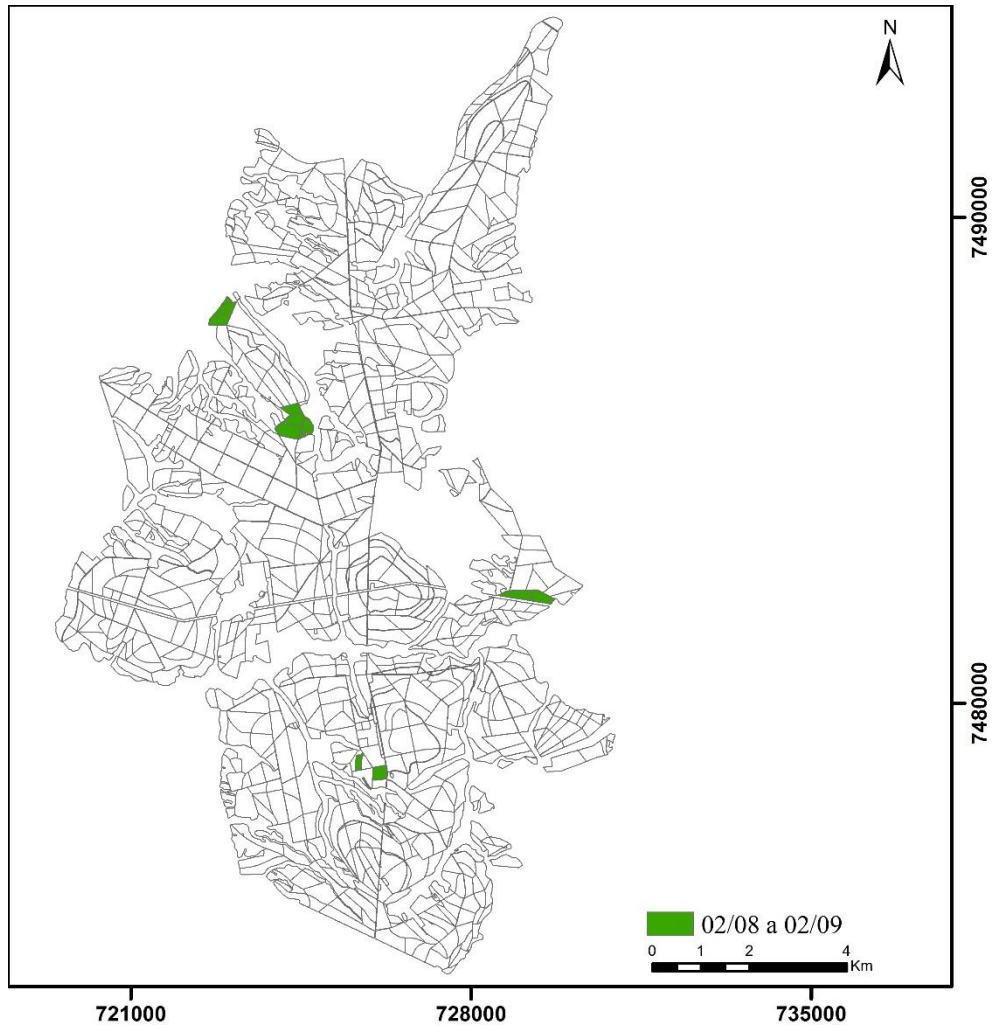


Figura 18. Talhões colhidos entre 2 de agosto e 2 de setembro.

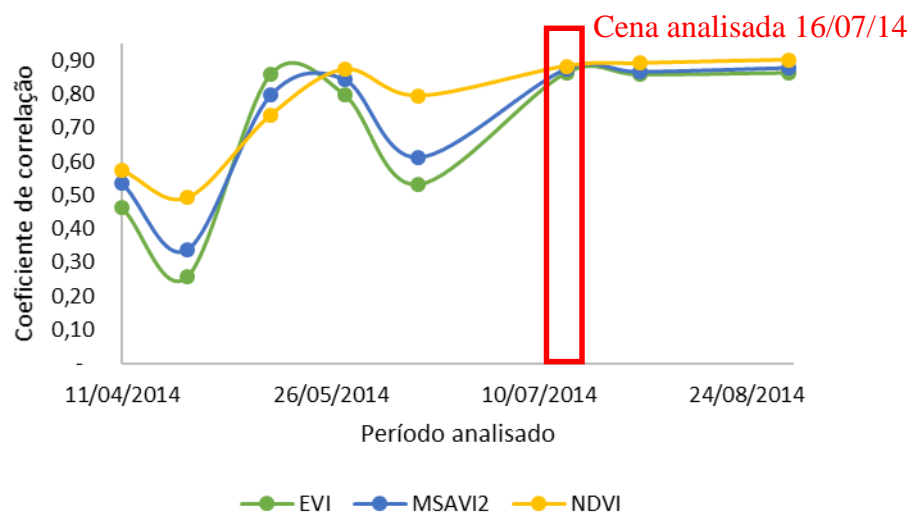


Figura 19. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 11/04/2014 e 02/09/2014.

Tabela 12. Produtividade e índices de vegetação em 16 de julho de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
39,41	0,4462	0,3431	0,5882
56,57	0,4093	0,3169	0,5722
82,12	0,5286	0,4278	0,6787
91,64	0,5049	0,3944	0,6346
113,27	0,5503	0,4525	0,7150

6.8 Colheita de 2 a 11 de setembro

Na Figura 20 estão representados os talhões colhidos entre 2 a 11 de setembro de 2014. Pode-se observar que os talhões estão dispersos na porção central e norte da área de estudo.

A Figura 21 representa a distribuição da correlação dos índices nos 6 meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 13 de maio de 2014.

O índice com maior valor de correlação nesse período foi o NDVI, com valores muito próximos ao MSAVI2. O EVI foi o índice que apresentou menores valores no período analisado.

A Tabela 13 representa os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 13 de maio de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

A correlação entre os valores de produtividade e o EVI foi de 0,48, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,61 e entre a produtividade e o NDVI de 0,64.

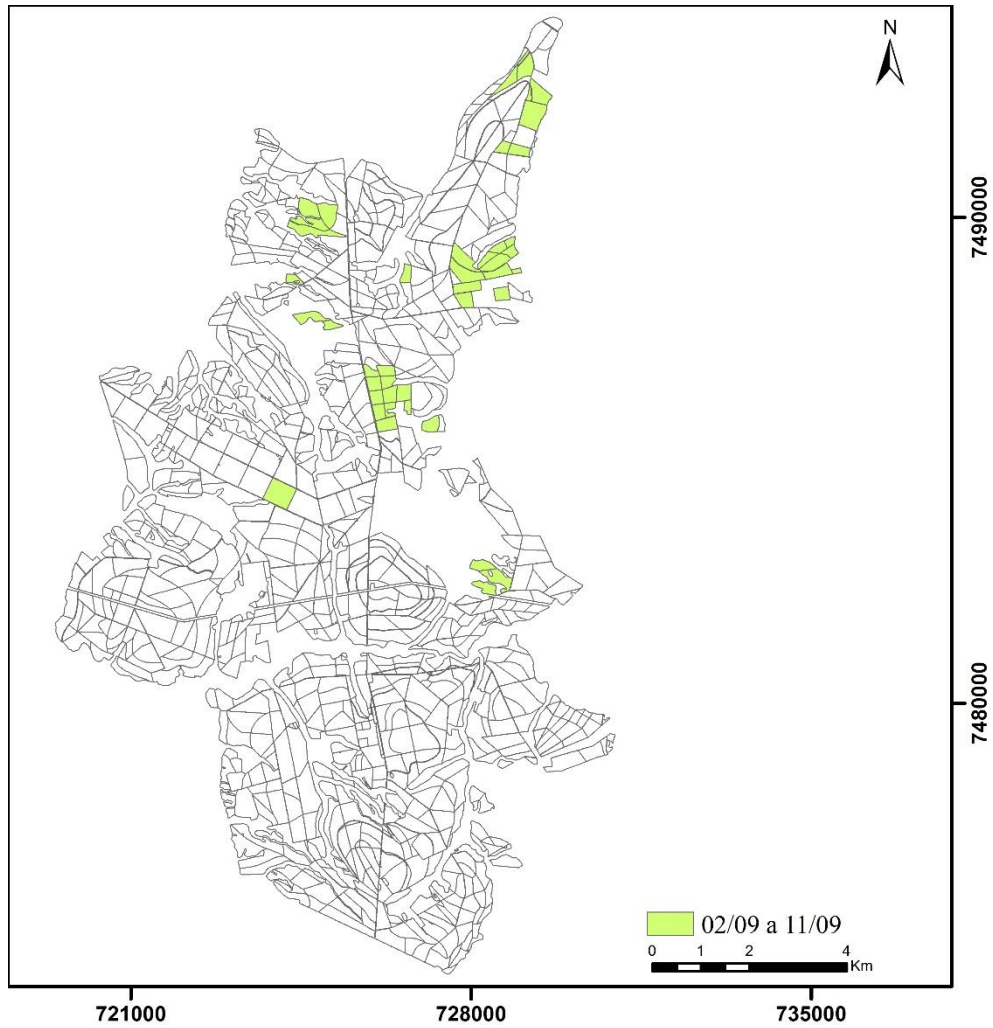


Figura 20. Talhões colhidos entre 2 e 11 de setembro.

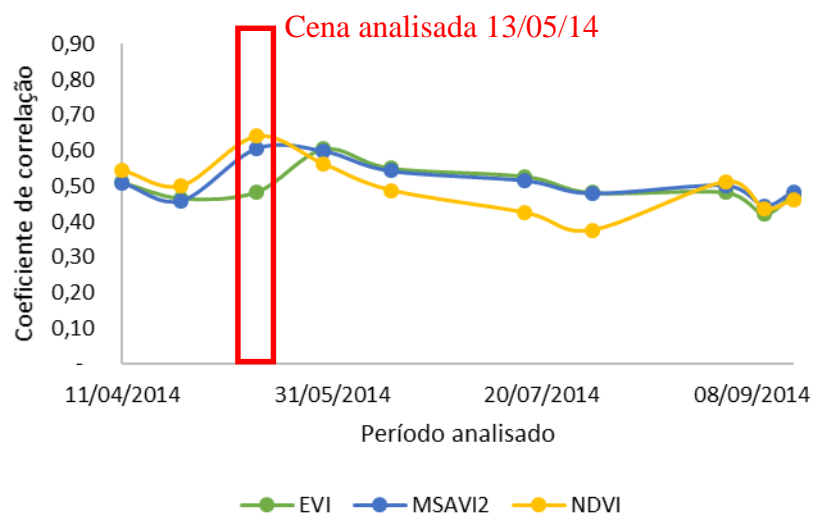


Figura 21. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 11/04/2014 e 11/09/2014.

Tabela 13. Produtividade e índices de vegetação em 13 de maio de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
34,72	0,6141	0,4185	0,6184
35,52	0,4737	0,3178	0,5263
54,39	0,6601	0,4895	0,6735
62,32	0,5013	0,3314	0,5345
66,47	0,6867	0,5443	0,7341
69,38	0,6483	0,4690	0,6767
71,27	0,5999	0,4700	0,6869
76,04	0,6617	0,5205	0,7126

6.9 Colheita de 12 de setembro a 4 de outubro

Na Figura 22 estão demonstrados os talhões colhidos entre 12 de setembro e 4 de outubro de 2014, pode-se observar que estão aglomerados na região sudeste da área de estudo.

Observa-se na Figura 23 a distribuição da correlação dos índices nos 6 meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 4 de outubro de 2014.

Nota-se valores distintos dos índices no período selecionado, observando-se que o NDVI é o índice que demonstra os maiores valores, seguido do MSAVI2 e do EVI.

Na Tabela 14 estão contidos os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 4 de outubro de 2014, data em que se apresentaram maiores correlações.

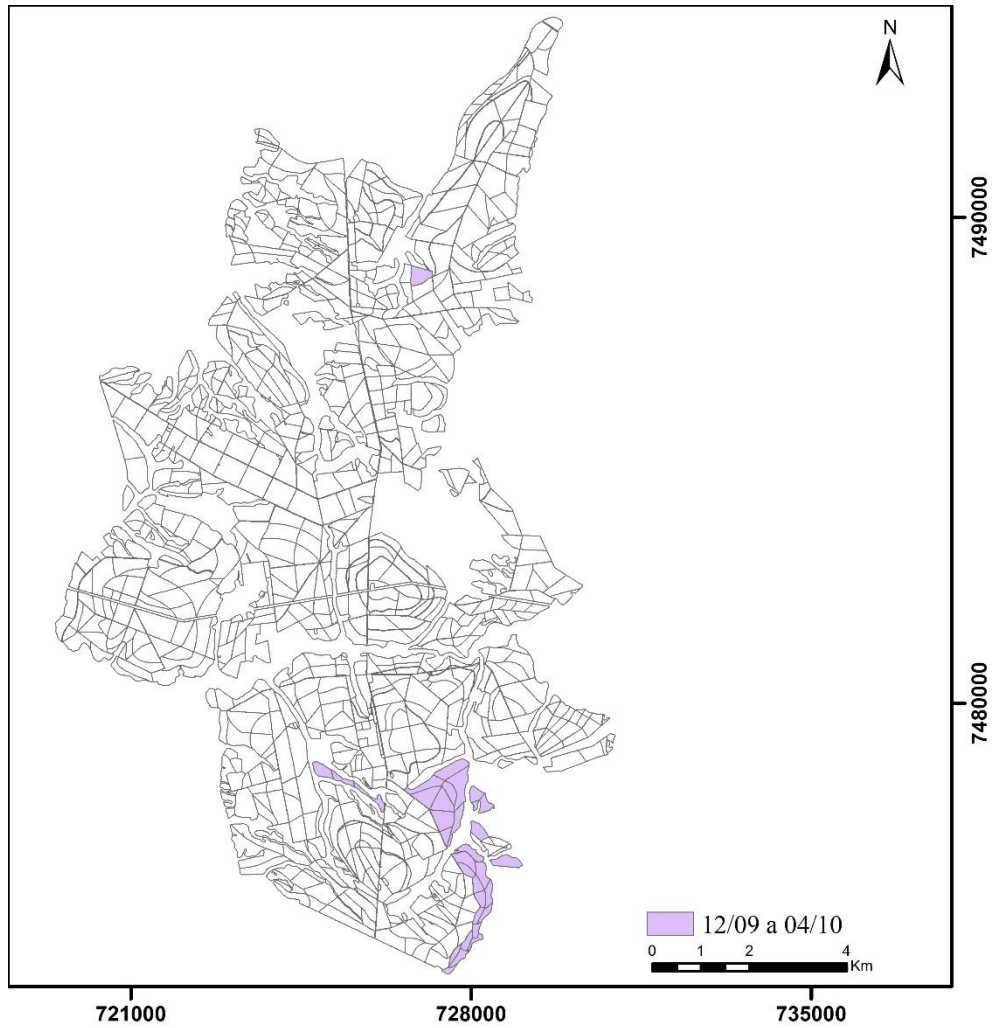


Figura 22. Talhões colhidos entre 12 de setembro e 4 de outubro.

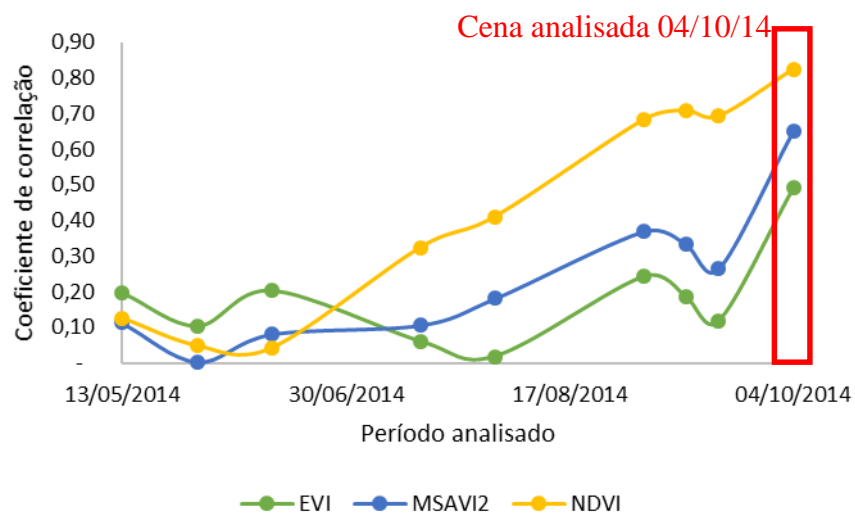


Figura 23. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 13/05/2014 e 04/10/2014.

Tabela 14. Produtividade e índices de vegetação em 4 de outubro de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
54,15	0,3835	0,2923	0,5461
68,30	0,4513	0,3491	0,6079
69,61	0,4534	0,3498	0,5972
74,47	0,4227	0,3266	0,5784
76,03	0,4226	0,3353	0,6361
79,05	0,4225	0,3340	0,6261

A correlação entre a produtividade e o EVI foi de 0,49, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,65 e entre a produtividade e o NDVI de 0,82.

6.10 Colheita de 5 a 13 de outubro

Na Figura 24 estão representados os talhões colhidos entre 5 e 13 de outubro de 2014. Pode-se observar que os talhões estão dispersos na porção marginal inferior da área de estudo.

A Figura 25 representa a distribuição da correlação dos índices nos 6 meses anteriores à data final da colheita e se escolheu como referência a data cujos valores mais expressivos (maior correlação entre o maior número de índices) estão na cena do dia 13 de maio de 2014.

Ao longo do período analisado os índices demonstraram um comportamento muito próximo e com gradual decréscimo.

A Tabela 15 representa os valores de produtividade e os valores dos índices de vegetação EVI, MSAVI2 e NDVI relativos ao dia 13 de maio de 2014, data em que os índices apresentaram maiores correlações.

A correlação entre os valores de produtividade e o EVI foi de 0,21, entre a produtividade e o MSAVI2 de 0,63 e entre a produtividade e o NDVI de 0,74.

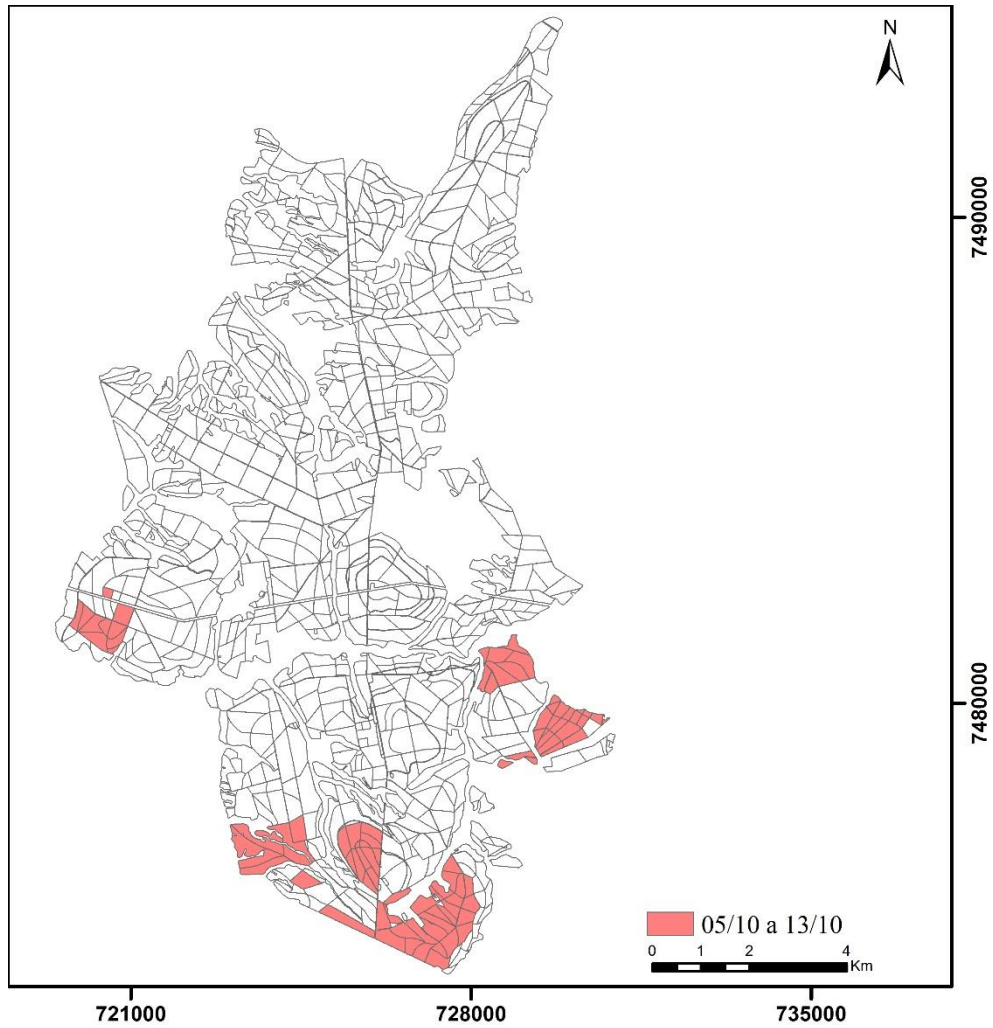


Figura 24. Talhões colhidos entre 5 e 13 de outubro.

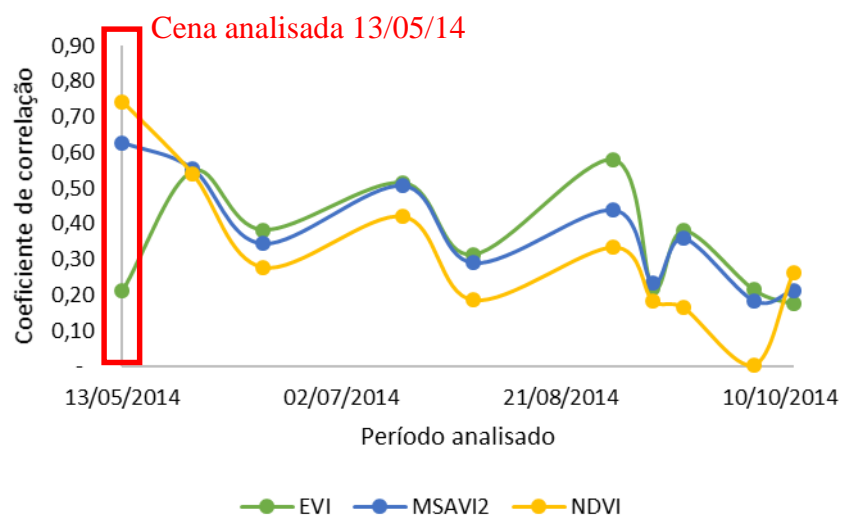


Figura 25. Correlação entre as médias dos índices de vegetação e produtividade entre 13/05/2014 e 13/10/2014.

Tabela 15. Produtividade e índices de vegetação em 13 de maio de 2014

Produtividade (t/ha)	EVI	MSAVI2	NDVI
42,05	0,6462	0,4477	0,6466
52,46	0,6086	0,4785	0,6893
53,83	0,5896	0,4611	0,6634
53,84	0,5723	0,4475	0,6576
54,15	0,6946	0,5100	0,6969
60,71	0,6682	0,5353	0,7330
63,54	0,5778	0,4508	0,6712
66,98	0,6202	0,4913	0,7030
67,31	0,6170	0,4821	0,6838
67,84	0,6182	0,4922	0,7085
71,14	0,6619	0,5306	0,7259
78,73	0,6782	0,5339	0,7320

6.11 Equações de produtividade

Com os dados provenientes das colheitas citadas em tabelas de cada período, foi calculado a regressão linear múltipla de cada cena analisada, produzindo-se as equações de produtividade demonstradas na Tabela 16, para cada período de colheita.

Constata-se na Tabela 16 que as equações possuem valores de F de significação diferentes entre si, e este valor demonstra a confiabilidade das equações. Quando os valores de F de significação forem menores que 0,05 permite-se concluir que a regressão linear existe e é viável.

Os períodos de 30/05 a 14/06, 15/06 a 16/07, 02/08 a 02/09 e 02/09 a 11/09 obtiveram valores de F de significação maiores que o limite estabelecido, sugerindo que os índices de vegetação estudados não são suficientes para a elaboração do modelo de produtividade nessas épocas.

Verificou-se que os coeficientes de determinação R^2 das equações produzidas variaram de 0,15 a 0,97, isto é, de toda a variabilidade, de 15% a 97% das produtividades podem ser explicadas pelos índices de vegetação.

Tabela 16. Equações de produtividade geradas por meio dos dados coletados nas cenas selecionadas

Período	Equações de produtividade (t/ha)	F de signif.	R ²
14/04 a 27/04	Produtividade = 408,3 - 1055 EVI + 1470 MSAVI2 - 570 NDVI	0,009*	0,97
28/04 a 13/05	Produtividade = 382 - 1150 EVI + 2198 MSAVI2 - 931 NDVI	0,001*	0,84
14/05 a 29/05	Produtividade = 83,9 - 315 EVI + 405 MSAVI2 + 6 NDVI	0,008*	0,30
30/05 a 14/06	Produtividade = 67,5 - 135 EVI + 197 MSAVI2 + 2 NDVI	0,239	0,15
15/06 a 16/07	Produtividade = -57 + 450 EVI - 408 MSAVI2 + 97 NDVI	0,121	0,27
17/07 a 01/08	Produtividade = -233 + 115 EVI - 26 MSAVI2 + 337 NDVI	0,001*	0,69
02/08 a 02/09	Produtividade = -1115 + 3459 EVI - 6303 MSAVI2 + 3046 NDVI	0,523	0,82
02/09 a 11/09	Produtividade = -21 - 236 EVI + 22 MSAVI2 + 329 NDVI	0,323	0,55
12/09 a 04/10	Produtividade = 344,6 - 4254 EVI + 6264 MSAVI2 - 897 NDVI	0,040*	0,97
05/10 a 13/10	Produtividade = -125 - 101 EVI - 40 MSAVI2 + 388 NDVI	0,026*	0,67

*Significativo a 5% de probabilidade

Picoli et al. (2009) estimaram a produtividade de cana-de-açúcar por meio de NDVI, porém utilizando o sensor MODIS, e alcançaram coeficientes de correlação entre 0,25 a 0,31. Utilizando o satélite Landsat 7, Machado (2003), empregando bandas para a estimativa da biomassa de cana-de-açúcar, alcançou coeficientes de determinação de 0,11 a 0,52, utilizando métodos lineares, corroborando os resultados obtidos no estudo.

Notou-se que, nos dois períodos que demonstraram valores altos do coeficiente de determinação R² (0,97), 14/04 a 27/04 e 12/09 a 04/10, os talhões colhidos apresentaram-se aglomerados. O segundo melhor ajuste de modelo, do período de 28/04 a 13/05, com R² de 0,84, também ocorreram em locais com talhões coesos e aglomerados. Muito provavelmente as menores variações físicas e ambientais contribuíram para uma maior homogeneidade dos índices avaliados. Em pequenas áreas é razoável supor que ocorra apenas uma classe de solo e, conseqüentemente, retenção de água no terreno permaneceu praticamente com pouca variação. Levando-se em conta a precipitação, o mesmo também deve ocorrer, maior homogeneidade da entrada de água no sistema. Outra justificativa para a maior significância é que se supõe-se que nesses talhões foram implantadas a mesma variedade.

Assim como os períodos de 14/05 a 29/05, 30/05 a 14/06 e 15/06 a 16/07, apresentam-se distribuídos por toda área de estudo, sem padrão de aglomeração, com

coeficientes de determinação de 0,30, 0,15 e 0,27, respectivamente, pouco expressivos. Esses valores baixos de coeficientes de determinação, muito provavelmente foram obtidos devido aos fatores listados acima terem ocorrido de maneira inversa (dispersão dos talhões na área, classes de solo, precipitação e variedades da cultura, provavelmente distintos).

Como o concluído por Oliveira (2015), verificou-se resultados promissores na modelagem, utilizando-se variáveis espectrais, para a estimativa da produtividade agrícola em áreas com cana-de-açúcar, no entanto, as compatibilizações da resolução espacial das medidas de produção com a resolução espacial dos índices de vegetação podem proporcionar resultados mais precisos. Dessa forma, para a modelagem, torna-se necessário o uso de médias dos índices de vegetação dentro dos talhões, reduzindo-se a precisão das variáveis, reduzindo-se também a precisão da estimativa de produtividade.

7 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que áreas com amostras mais adensadas apresentaram maior significância entre os índices de vegetação e a produtividade. As imagens selecionadas para a modelagem foram distintas para cada período de colheita estudado. Pode-se concluir também que os períodos onde a produtividade foi melhor explicada por meio dos modelos matemáticos foi o de 14/04 a 27/04 e 12/09 a 04/10. E os índices de vegetação estudados continuam mostrando-se promissores na explicação da produtividade.

Para trabalhos futuros sugere-se a incorporação de outras variáveis de solo e planta, como também diferentes índices de vegetação, para que a análise não fique restrita a um determinado local, e para que a modelagem possua uma maior representatividade.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V. **On-the-go soil sensors** — are we there yet?. In: Proceeding of The Second Global Workshop on Proximal Soil Sensing. Montreal, p. 160–163, 2011.

AHAMED, T. et al. Site-specific management for biomass feedstock production: development of remote sensing data acquisition systems. In: Proceedings of 10th international conference on precision agriculture. **Anais...** Denver Colorado, 18 e 21 Jul 2010.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JUNIOR, M. J., BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas, v. 1, p. 42-55. Fundação Cargill, 1987.

BARBOSA, A. P. **Comparação de métodos de classificação de imagem, visando o gerenciamento de imagens citrícolas**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu ,2009.

BATISTELLA, M. et al. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2004. Disponível em: < <http://www.sat.cnpem.br>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

BUCENE, L.C. Classificação de terras para irrigação utilizando um sistema de informações geográficas em Botucatu – SP. Botucatu, 2002. 185 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: 2. ed. cap.1. Embrapa-SPI/Embrapa-CPAC, 1998.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos. Cap.1. INPE, 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. CEPAGRI. UNICAMP. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_305.html>. Acesso em 03 jan 15.

CHAPELLE, E.W.; KIM, M.S.; MCMURTREY, J.E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b and the carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.39, n. 3, p. 239 -247, mar. 1992.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Séries históricas**. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 22 jan 2016.

DE BENEDETTO, D.; CASTRIGNANÒ, A.; RINALDI, M.; RUGGIERI, S.; SANTORO, F.; FIGORITO, B.; GUALANO, S.; DIACONO, M.; TAMBORRINO, R. **An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data**. Geoderma, 2013.

DIKER, K.; BAUSCH, W.C.; PODMORE, T.H. GIS Mapping of Plant Parameters and Yield Potential Estimated by Remote Sensing. **ASAE Meeting**, Orlando/ Flórida, n. 983143, 1998.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 68, n. 2, p. 139-146, 2011.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de textos, 2002.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHALETER, J.C.; WEINDER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v.4, p.11-20, 1965.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Amsterdam. v.36, p. 2086-2097, 2008.

HUETE, A. R.. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment.**, New York, v. 25, p. 295-309. Elsevier Science Publishing Co, 1988.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: EPIHANIO, J.C.N (coord.)...[et. al]. São José dos Campos, Parêntese, 2009.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da Unesp, 1998.

LE BAIL, M. et. al. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurement? **European Journal Agronomy**, v. 23, n. 4, p. 379-391, 2005.

LEINONEN, I.; JONES, H.G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. **Journal of Experimental Botany**, London. v. 55, p. 1423–1431, 2004.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. United States of America: John Wiley & Sons. 3. ed., 1994.

LIMA, R. N. S.; RIBEIRO, C. B. M.. Comparação de métodos de correção topográfica em imagens Landsat sob diferentes condições de iluminação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 66, p.1097-1116, set. 2014.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP. 1. ed., 2006.

MACHADO, H.M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 - ETM+**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2003. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio 2008/2009 a 2019/2020**. Brasília, 2010. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 12 de jan de 2014.

MOLLER, M. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**. London. v. 58, n. 4, p. 827–838, 2007.

MONTEIRO, P. F. C.; et al . Índices de vegetação simulados de diferentes sensores na estimativa das variáveis biofísicas do feijoeiro. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 48, n. 4, p. 433-441, 2013 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2013000400012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 Mar. 2016.

MONTGOMERY, D. C.; VINING, G. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 3. ed. 2001.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 250p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat Data Continuity Mission: Continuously Observing Your World**. 2013. Disponível em: <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/mission_details.html>. Acesso em: 19 jan 2016.

NOGUCHI, M. T. G. **Um sistema baseado em regras fuzzy para classificação supervisionada de imagens multiespectrais de alta resolução**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Informática), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda. 3. ed. 2008.

OLIVEIRA, G. S. **Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função dos índices de vegetação utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. 80 f. Dissertação (Mestrado em agronomia – Ciência do solo, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2015.

PICOLI, M.C.A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, p. 789-795, 2009.

PINTER, JR., P.J. et al. The Agricultural Research Service's remote sensing program: An example of interagency collaboration, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, San Diego. v. 69, n. 6, p. 615–618, 2003.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In. **Sensoriamento Remoto - Reflectância dos alvos naturais**. Brasília, EMBRAPA, p. 157-199, 2001.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 127p., 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 127 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

QI, J.; CHEHBOUNI A.; HUETE A.R.; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN S. A. **Modified Soil Adjusted Vegetation**. 1994. Disponível em: <<http://nalcd.nal.usda.gov/download/50306/>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 42, p.73-80, 2007.

RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/USP. 23 a 25 de maio de 1990, p. 1-26.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Uberlândia: EDUFU, 2003.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005.

ROSS, J. L. S. & MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Humanitas/ipt/ fapesp, 1997.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation, In: NASA/GSFC. **Final Report, Greenbelt**. MD, USA, p. 1-137, 1974.

RUDORFF, B. F. T. **Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

SCARPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p 622-628, 2009.

SEPULCRE-CANTÓ, G. et al. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. **Agr.Forest Meteorol**, USA, v. 136, n. 1–2, p. 31–44, 2006.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Growth indices and productivity in sugarcane. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 62, n.1, p. 23-30, Jan. 2005.

SLATON, M. R.; HUNT, E. R.; SMITH, W. K. Estimating near infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics, **American Journal of Botany**, USA. v. 88, n. 2, p. 278–284, 2001.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, New York, v. 27, n. 2-4, p. 165-177, Sept. 2007.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o SPECTRON SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. ,1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE,1996. p. 9-14.

STEVEN, M. D.; MILLAR, C. **Satellite Monitoring for Precision Farm Decision Support**. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 4., 1997, p. 325-34.

TEILLET, P. M. ; GUINDON , B . ; GOODENOUGH, D. G. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. **Canadian Journal of Remote Sensing**. v. 8, n. 2, p. 84 – 106, 1982.

THENKABAIL, P.; LYON, J.G.; HUETE, A. **Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation**. Florida: Taylor e Francis Goup: Boca Raton, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). **Produção de cana-de-açúcar no Brasil (1990/1991 a 2012/2013)**. Disponível em: <www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/> Acesso em 27 de jan. 2015.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). **Relatório final da safra 2014/2015 – Região Centro Sul** Disponível em:

<<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=90>> Acesso em 18 de fev 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Product guide**. 2016. Disponível em: < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Data sets**. Disponível em <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em 22 Mar. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. (USGS). **Landsat Surface Reflectance High Level Data Products**. 2015. Disponível em:

<http://landsat.usgs.gov/CDR_LSR.php>. Acesso em: 7 fev. 2016.

UNO, Y. PRASHER; S. O., LACROIX, R.; GOEL, P. K.; KARIMI, T.; VIAU, A. A.; PATEL, R. M. Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data. **Computers and electronics in agriculture**. v. 47, p. 149-161, 2005.

URIBE, R. A. M. **Produtividade e estimativa de acúmulo da biomassa em soqueira de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de N-Fertilizantes**. 67 f.Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2010.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas ao planejamento regional. In: **Anais do VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. Presidente Prudente: ABGE, 1998. CD-ROM.