



JEFFERSON FRANCISCO SOARES

**CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA E VARIABILIDADE
ESPAÇOTEMPORAL DO ALGODOEIRO.**

LAVRAS – MG

2020

JEFFERSON FRANCISCO SOARES

CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA E VARIABILIDADE ESPAÇOTEMPORAL DO
ALGODOEIRO.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para obtenção do título de doutor.

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

LAVRAS – MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Soares, Jefferson Francisco.

Caracterização Radiométrica e Variabilidade Espaço-temporal
do Algodoeiro. / Jefferson Francisco Soares. - 2019.

67 p. : il.

Orientador(a): Marcelo de Carvalho Alves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Índice de vegetação. 3.
Transformação Tasseled Cap. I. Alves, Marcelo de Carvalho. II.
Título.

JEFFERSON FRANCISCO SOARES

CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA E VARIABILIDADE ESPAÇOTEMPORAL DO
AGROSSISTEMA DE MATO GROSSO.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para obtenção do título de doutor.

APROVADO em 06 de março de 2020

Dr. Fabio Moreira da Silva	UFLA
Dr. Mirléia Aparecida de Carvalho	UFLA
Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato	EPAMIG

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

LAVRAS – MG

2020

A Deus, OFEREÇO.

*Dedico aos meus pais, Marli e Francisco, minha fonte de inspiração.
A minha noiva, Mirelly, por todo amor, carinho, paciência e companheirismo.
Aos meus irmãos, Suelba e Walisson.
A todos os meus professores e amigos que me apoiaram ao longo desta etapa.*

AGRADECIMENTOS

Presto meus afetuosos agradecimentos a todos que acreditaram em mim, torceram e me deram forças, nessa árdua, porém, prazerosa etapa de crescimento pessoal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa, e à Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade de realização do curso.

Especial agradecimento ao professor Marcelo de Carvalho Alves, pela amizade, compreensão, orientação e ensinamentos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia e da UFLA, em especial os professores Marcelo Silva de Oliveira, Luís Marcelo Tavares de Carvalho, Gilberto Coelho e Mirleia Aparecida de Carvalho pelos ensinamentos e pela amizade que foi construída.

A professora Gláucia Miranda Ramirez que me incentivou desde o início a avançar na minha vida acadêmica, desde a iniciação científica na graduação.

A secretária do PPGEA Helem Cristina Carmo pela paciência, dedicação e atenção para com todos e a mim, agradeço a amizade que criamos.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, estudantes e todos os funcionários.

À Mirelly, pelo companheirismo, amor apoio em todos momentos e singular torcida.

Agradeço a minha família, pilar de sustentação da minha vida.

Aos meus amigos, em geral.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	7
1. INTRODUÇÃO GERAL	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Mercado do algodoeiro	10
2.2 Sensoriamento remoto na agricultura do algodoeiro.	10
2.4 Índices de vegetação	13
2.5 Sensoriamento remoto na resistência à penetração do solo	14
2.6 Geoestatística aplicada na agricultura	16
2.7 Satélite Landsat 5	17
2.8 Sensoriamento remoto no estudo de dados Landsat	18
REFERÊNCIAS	20
SEGUNDA PARTE – “ARTIGOS”	26
ARTIGO 1	27
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1. Área de estudo	31
2.2. Coleta de dados in situ	33
2.3. Índices de vegetação	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
5. AGRADECIMENTOS	42
6. REFERÊNCIAS	42
ARTIGO 2	44
1. Introdução	47
2. Material e métodos	48
3. Resultados e discussão	56
4. Conclusão	64
Agradecimentos	65
Referências	65

PRIMEIRA PARTE

CARACTERIZAÇÕES RADIOMÉTRICAS E ESTUDOS TEMPORAIS DO
ALGODOEIRO.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) entre os anos safra de 2006/07 e 2016/17, foi o quinto maior produtor mundial de algodão em pluma. Contudo, a produção de algodão nacional na safra 2015/2016 atingiu seu menor valor nos últimos 10 anos, coincidindo com os anos em que segundo a CONAB os produtos fitossanitários e fertilizantes atingiram em média 60% dos custos operacionais de produção nos principais municípios produtores de algodão do país.

Uma ferramenta computacional que permite uma análise da vegetação de forma processual, possibilitando identificar eventos específicos no tempo e no espaço é o sensoriamento remoto. Existem diversas técnicas para monitorar a vegetação e detectar alterações que podem auxiliar no manejo de diferentes culturas. Contudo, na prática, a seleção do método mais adequado não é fácil, sendo o objetivo da análise e a área de estudo fatores decisivos na escolha do método.

Estudos de sensoriamento remoto na tentativa de detectar e separar uma cultura de diferentes tipos de uso do solo e até mesmo de outras culturas foi por muito tempo a atividade primordial no âmbito agrícola, técnicas tradicionais onde o pixel é a unidade básica para a análise da imagem foram estudados de formas diferentes na comunidade de sensoriamento remoto.

Existem dados de bibliotecas digitais que fornecem informações e possibilitam análises e estudos que podem refutar ou reforçar hipóteses. O programa Landsat 5 é um exemplo, este satélite possui um acervo de dados que ao se unir com dados de campo, pode prover informações interessantes para diferentes tipos de pesquisas e estudos.

Alguns algoritmos possuem a capacidade de detectar alvos pelos valores dos pixels, e alguns estudos tiveram enfoque na cultura do algodão, com o algoritmo de classificação supervisionada (GONZALEZ-DUGO et al., 2007), classificação não supervisionada e o método de classificação visual (MENKE et al., 2009) também foram empregados em alguns estudos.

Um avanço nas aquisições de dados de sensoriamento remoto com enfoque na cultura do algodão foi a utilização de índices de vegetação (ZHAO et al., 2007; RAMIREZ, 2010; AGUIRRE-GUTIERREZ et al., 2012; CONRAD et al., 2013) e em diferentes alvos com o intuito de monitorar e caracterizar a cobertura da solo (O'CONNOR et al., 2012; HILL, 2013; MA et al., 2013; DANGWAL et al., 2015; FENG et al., 2017). Os índices também podem ser usados para fornecer estimativas de parâmetros biofísicos para compor modelos mais

elaborados de crescimento de culturas e de estimativas de produtividade usando dados de múltiplas fontes em escala regional (PRASAD et al., 2006; RIZZI e RUDORFF, 2007).

Um outro enfoque para o uso dos dados de sensoriamento são as discriminações de assinaturas espectrais de culturas, vários pesquisadores tem utilizado imagens multiespectrais de data única para perfis de fenologia e classificação de culturas (YANG et al., 2011; MELLOR et al., 2013). Em especial para a cultura do algodão, estudos que definam a assinatura espectral de uma única data foram abordados (ZHANG et al., 2013) e uma abordagem recente é a utilização dados de serie temporal em produtos de NDVI na detecção da fenologia do algodão, (MASSEY et al., 2017), estas abordagens técnicas forneceram, de certa forma, detalhes relevantes sobre a fenologia. Contudo, ainda existem contribuições a serem realizadas.

E a integração de informações de sensoriamento remoto, com informações detalhadas da cultura e do solo formam um conjunto de tecnologias capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura. É o caso do desenvolvimento de áreas como a automação e controle, robótica, nanotecnologia, agricultura de precisão, pós-colheita, agro-energia, ciência dos solos, meio ambiente e mudanças climáticas. Incluem-se, ainda, a construção de equipamentos e sensores, além da elaboração e aplicação de métodos, modelos e sistemas avançados (CRESTANA; FRAGALLE, 2012; DUHAN et al., 2017).

A abrangência do fluxo de informações atualmente está cada vez mais ilimitada, sensores de aquisição de dados terrestres, aéreos e orbitais estão empilhando dados e as metodologias empregadas nem sempre acompanham com eficiência a utilização destes dados.

A cultura do algodoeiro possui variações fenológicas que podem ser monitoradas por radiômetro orbital de alta resolução temporal e espacial e é possível caracterizar a magnitude e a estrutura da dependência espacial do algodoeiro utilizando geoestatística espaçotemporal e krigagem 3D.

Diante deste cenário, este trabalho aferiu as potencialidades dos produtos gerados pelos dados do satélite Landsat 5 na caracterização radiométrica e variabilidade espaçotemporal de fatores bióticos e abióticos do algodoeiro em um agrossistema, e propôs uma metodologia para acompanhar o desenvolvimento fenológico da cultura do algodão na região da chapada dos Guimarães, Mato Grosso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mercado do algodoeiro

O algodão está entre as mais importantes culturas de fibras do mundo. Todos os anos, cerca de 35 milhões de hectares de algodão são plantados em todo o planeta e o comércio mundial do algodão movimenta anualmente cerca de US\$ 12 bilhões, sendo produzido por mais de 60 países, nos cinco continentes (ABRAPA, 2018).

O Brasil segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) entre os anos safra de 2006/07 a 2016/17, foi quinto maior produtor mundial de algodão em pluma. Nesse mesmo período, a maior participação na produção nacional foi registrada para os estados do Mato Grosso com 67,1% do total produzido.

Contudo, a produção de algodão nacional na safra 2015/2016 atingiu seu menor valor nos últimos 10 anos, coincidindo com os anos em que segundo a CONAB os produtos fitossanitários e fertilizantes atingiram em média 60% dos custos operacionais de produção nas principais cidades produtoras de algodão do país.

Os agricultores, muitas das vezes, na tentativa de aumentarem a produtividade, utilizam uma maior aplicação de insumos, como fertilizantes, herbicidas e pesticidas, adotam modernas variedades de plantas, cultivares, mecanização e novas técnicas agrícolas (DEININGER E BYERLEE, 2012; FENG et al., 2017), muitas das vezes de forma imprudente e sem critérios, podendo gerar gastos desnecessários.

Estudos que possam minimizar alguns destes custos operacionais estão sendo constantemente avaliados na expectativa que seja relevante, uma vez que estes valores são significativos perante ao custo de produção.

2.2 Sensoriamento remoto na agricultura do algodoeiro.

O sensoriamento remoto permite uma análise da vegetação de forma processual, possibilitando identificar eventos específicos no tempo e no espaço. Existem diversas técnicas para monitorizar a vegetação e detectar alterações. Contudo, na prática, a seleção do método mais adequado não é fácil, sendo o objetivo da análise e a área de estudo fatores decisivos na sua escolha.

Métodos de classificação do uso do solo considerados clássicos no sensoriamento remoto foram empregados e suas abordagens deixaram marcadas suas qualidades e desvantagem.

Estudos de classificação visual de imagem na descrição de diferentes usos do solo foram investigados. Menke et al. (2009), utilizaram do método de pós-classificação na análise de mudanças de uso do solo no município de Luís Eduardo Magalhães, BA-Brasil, assim conseguiram diferenciar dentro da classe de agropecuária as culturas de soja, algodão, milho e café presentes na área de estudo, juntamente com outras 5 classes. Porém ressalta-se que este método tem como desvantagem não ser completamente automático, tornando-se lento no desenvolvimento, e além disso, exige um conhecimento prévio da área ou uma necessidade de confirmação em campo e a precisão da detecção das mudanças está inteiramente dependente da acurácia da classificação.

Já Aguirre-Gutierrez et al. (2012), compararam técnicas de detecção de alteração da cobertura do solo nas montanhas da Serra Madre Ocidental, México, utilizando imagem Landsat ETM+ nos anos de 1999 e 2006, ao analisar sete diferentes categorias de solo, dentre elas a cultura do algodão. Comparou três técnicas de classificação, uma baseada a objeto, uma baseada nos valores digitais dos pixels e outra utilizando o método de classificação combinada. Os resultados de precisão de classificação foram de 0,74 e 0,81 para o método de valores dos pixels, 0,77 e 0,71 para método orientado a objeto e 0,88 e 0,87 para a análise combinada, demonstrando a assertividade no uso da técnica.

A disponibilidade de imagem de alta resolução espacial tem a vantagem de identificar diferentes tipos de feições indetectáveis em imagem de média e baixa resolução espacial. Contudo os algoritmos de classificação tiveram que ser redesenhados para trabalhar com dados de alta resolução, uma vez que novos fatores como sombra de árvores ou de edificações pode causar uma interpretação errada da imagem.

Conrad et al. (2013), investigaram o método baseado em objeto para determinar a distribuição de culturas irrigadas de algodão e trigo no Vale de Fergana, no sudeste do Uzbequistão. Imagens dos sensores Landsat 5 e RapidEye adquiridas antes do início das principais fases de irrigação, foram segmentadas e processadas pelo algoritmo Random Forest. Os recursos extraídos dos dados dos satélites foram as bandas espectrais (RapidEye:1-5, Landsat: 1-6) e os índices de vegetação (NDVI, EVI, SAVI). As classificações alcançaram uma precisão geral de 86,2% e apresentou um alto desempenho para algodão onde a precisão do produtor alcançou 95% (usuário 89%) na matriz de confusão.

Técnicas que levem em consideração valores dos diferentes índices de vegetação são extremamente apropriadas levando em consideração as diferenças que cada cultura possui em sua fenologia.

2.3 Fenologia do algodoeiro

Durante a maior parte do ciclo da planta de algodão há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação de frutos. Cada um destes eventos é importante para a produção final, mas é necessário que eles ocorram de modo balanceado (OOSTERHUIS, 1992).

De acordo com Rosolem (2010), o ciclo fenológico do algodoeiro pode ser dividido em fases de crescimento e alguns processos característicos da cultura que definem cada uma destas fases.

No período vegetativo, entre a emergência da plântula e até que a primeira folha verdadeira tenha o comprimento de 2,5 centímetros de nervura principal, o estágio será V0. A partir do limite anterior e até que a segunda folha verdadeira tenha a sua nervura principal com comprimento de 2,5 centímetros, o estágio será V1. Sucessivamente, aplicando o mesmo critério, a planta avançará para os estádios V2, V3, V4, Vn. Nesta fase, considera-se folha verdadeira expandida quando a nervura principal de seu limbo foliar for maior que 2,5 centímetros.

No início da fase reprodutiva, ou seja, quando o primeiro botão floral estiver visível, o estágio passa a ser B1. Quando o primeiro botão floral do segundo ramo reprodutivo estiver visível, a planta estará no estágio B2. Assim, sucessivamente, à medida que o primeiro botão floral de um novo ramo frutífero estiver visível, o estágio passará a ser Bn.

A indicação da fase B não será mais utilizada a partir do momento em que o primeiro botão floral do primeiro ramo frutífero se transformar em flor. A partir de então, o estágio de desenvolvimento passará a ser F1. O estágio de desenvolvimento será F2 na abertura da primeira flor do segundo ramo frutífero. Nota-se nessa fase, também, a abertura da flor na segunda estrutura do primeiro ramo frutífero. Sucessivamente, à medida que ocorrer a abertura da primeira flor do ramo frutífero de número n, o estágio passará a ser Fn.

Quando a primeira bola do primeiro ramo se transformar em capulho o estágio de desenvolvimento passará a ser C1. Sucessivamente, o estágio será Cn à medida que ocorrer a abertura da primeira bola do ramo frutífero de número n. Alguns autores ressaltam que a

padronização da cultura do algodoeiro dessa forma, torna-se fácil comparar com outros trabalhos de pesquisas realizados em diferentes localidades (ROSOLEM, 2010; MARUR & RUANO, 2010).

2.4 Índices de vegetação

A aplicação de índices de vegetação derivados de dados orbitais tem sido utilizada em uma ampla variedade de aplicações cujo intuito é o monitoramento e a caracterização da cobertura vegetal.

Uma aplicação viável é a utilização de dados de séries temporais na detecção de diferentes tipos de culturas e suas respectivas fenologias. Como foi feito por Massey et. al. (2017), ao utilizarem dados do sensor de baixa resolução espacial na elaboração de séries temporais para diferentes culturas a partir do zoneamento agrícola determinado pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), utilizando produtos de índices de vegetação gerados com imagem do sensor MODIS. Desta forma, identificaram diferentes culturas pelos limiares máximos e mínimos de respostas ao índice de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), dentre elas a cultura do algodão. Assim sendo, foi possível realizar o mapeamento automatizado e rotineiro de culturas sem uma coleta repetida e dispendiosa de amostras de campo ano após ano.

Diversos índices de vegetação são constantemente aplicados na tentativa de determinar e descrever respostas de culturas agrícolas, e apresentam estreita relação com características fenológicas das culturas.

Estudos de sensoriamento remoto na caracterização de culturas através da detecção do comportamento espectral com a utilização de análises temporais de imagem de satélite estão sendo utilizados no controle agrícola em Portugal. Silva (2015), utilizando valores de NDVI, propôs a evolução de culturas perenes e culturas temporárias ao longo da série temporal e pode descrever detalhes sobre a fenologia das culturas da região de Torres Vedras, oeste de Portugal, e salienta que as imagens foram aplicadas ao Principal Component Analysis (PCA). Segundo Lillesand et al. (2008), uma transformação dos dados multivariados para um novo conjunto de componentes, reduz a redundância dos dados. Os valores obtidos pelo índice NDVI permitiram estabelecer padrões para identificação das culturas de milho, algodão, oliveira e kiwi, as identificações classificadas foram, posteriormente, validadas junto as declarações dos produtores.

Gonzalez-Dugo et al. (2007), ao analisarem índices de vegetação espectral para avaliar produtividade do algodão irrigado e beterraba em uma província de Sevilha, Espanha, na safra de 2003-2004, identificaram que os índices de vegetação NDVI e SAVI estavam intimamente relacionados com as variáveis detalhadas do solo, que foram medidas auxiliares da cobertura do solo, altura da planta, índice de área foliar e biomassa, todos obtidos por radiômetro, e salientou que ambas as medições possuem relações fortes com a cultura in situ.

Já Galvão et al. (2009), utilizaram de imagens de sensor orbital e calcularam 17 índices de vegetação e correlacionaram com a produtividade da soja em uma fazenda no município de Querência-MT, onde encontrou a maior correlação ($r = +0,74$) com a produtividade da soja na cultura de 2005/2006 com o índice NDWI. Porém, ressaltam que as imagens utilizadas foram adquiridas nos estágios reprodutivos iniciais de desenvolvimento da soja.

De modo geral, ainda que os conjuntos de dados especialmente mapas de cobertura de terra agrícola estejam sendo aplicadas amplamente, ainda apresentam falhas de precisão e detalhes (FRITZ et al., 2013). Informações que descrevem a agricultura além da área, como intensificação agrícola estão especialmente ausentes (KUEMMERLE et al., 2013). Os mapas de cobertura terrestre que descrevem a área agrícola não são suficientes para melhorar a nossa compreensão da rápida mudança agrícolas (VALLEJOS et al., 2015).

2.5 Sensoriamento remoto na resistência à penetração do solo

Atualmente o aumento da produtividade no campo é notável, esta competência se deve as operações mecânicas no setor agrícola, sendo que, as máquinas aumentaram tanto de tamanho quanto de capacidade. A atuação de maquinário cada vez especializado gera máquinas mais pesadas, o que representa uma preocupação com o impacto que isto venha a causar na compactação do solo e o desempenho subsequente das próximas culturas.

A produção de algodão nacional envolve maquinários pesados e altamente tecnificados. Durante o processo de colheita, ainda no campo, o algodão em caroço é colhido, prensado e embalado na forma de fardões retangulares ou cilíndricos, que pesam em torno de 8 mil kg a 9 mil kg e 2,4 mil kg a 2,5 mil kg, respectivamente, e ficam armazenados na unidade de produção até a sua retirada e transporte para a usina de beneficiamento (CONAB, 2017).

Devido a constante movimentação de máquinas agrícolas nas áreas de culturas, o solo recebe cargas que aumentam a resistência do solo à penetração, ou seja, a compactação (Cortez et. al., 2010). Os sistemas de preparo e as colheitas agrícolas interferem de modo significativo

nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (CATTELAN & VIDOR, 1990; GOVAERTS et al., 2007).

A resistência à penetração do solo é uma medida utilizada para quantificar a impedância mecânica do solo para o crescimento das raízes das plantas (BENGOUGH et. al., 2011). Portanto, a resistência à penetração do solo é considerada um dos principais parâmetros para o diagnóstico dos níveis de compactação do solo e determinação das camadas de solo mais restritivas para o crescimento radicular (GIRARDELLO et al., 2014).

Cortez et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial da resistência à penetração em um argissolo amarelo, compactado pela movimentação de máquinas agrícolas na colheita em uma área amostral no município de Petrolina – PE, conduzido pelo Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco. O estudo foi realizado em quatro profundidades entre 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, sendo que para cada intervalo de profundidade foi gerado um mapa de resistência à penetração. Os resultados obtidos apresentaram presença de compactação próximos da camada de 20 cm sendo os valores próximo ou superiores a 6,0 MPa.

Uma outra pesquisa realizada na Austrália por Braunack et al. (2014), em um maquinário de tecnologia picking de enfardamento de módulos redondos em pneus duplos. Este estudo quantificou as mudanças na resistência do solo devido ao tráfego de picker durante a colheita. As medições da resistência do solo foram realizadas antes e depois do trânsito pela nova enfardadora modular (32 t) e pela enfardadora anterior de cesta (16 t) durante uma temporada de colheita de algodão. Os resultados obtidos mostraram que em ambas as enfardadeiras o solo aumentou sua resistência a penetração, e o aumento foi detectado em profundidades de no máximo 0,6 metro, sendo a zona de maior resistência do solo de 3 Mpa, ocorreu mais perto da superfície do solo sob a nova enfardadeira na zona de 0,3 metros.

Já Bennetta et. al. (2017), propuseram um cultivo de tráfego controlado em uma cultura de algodão para reduzir o impacto da colhedora na compactação do solo e uma alteração no espaçamento da linha de plantio convencional de 1 metro, para 1,5 metros. A umidade, a densidade e a resistência do solo foram medidas imediatamente antes e após a colheita, juntamente com o rendimento das culturas, para duas estações de algodão. Em ambas as análises apresentaram compactação do solo, porém, foi possível observar uma redução de 17% no tráfego de sulcos para o sistema tráfego controlado e uma compactação horizontal maior a uma profundidade de 0,35-0,40 m, perpendicular à direção da marcha da máquina no plantio convencional.

O estudo da resistência do solo à penetração tem sido amplamente utilizado por pesquisadores e provedores de serviços, pois é rápida e fácil de usar no campo em comparação com outros métodos convencionais, como a densidade aparente do solo (MOLIN, DIAS, & CARBONERA, 2012).

2.6 Geoestatística aplicada na agricultura

A heterogeneidade dos atributos do solo em lavouras é comum, afetando diferenciadamente o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Essa variabilidade do solo, muitas vezes não é puramente aleatória, mas apresenta dependência espacial e temporal, quer seja, pelo processo natural do solo ou pelas práticas agrícolas (ABREU et al., 2003; SILVA et al., 2004; TREVISAN, 2005; CORÁ et al., 2006).

Estudos estatísticos clássicos eram utilizados em pesquisas agronômicas para avaliação de atributos do solo, os quais consideravam os valores amostrados como dependentes entre si, desconsiderando sua localização na área como um todo (CORRÊA et al., 2009). Neste caso, os experimentos foram realizados para diminuir o impacto da variabilidade espacial, sendo ignorado o fato de que as observações podem ser espacialmente dependentes.

A variabilidade espacial dos atributos dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises dos solos, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (SILVA et al., 2010).

Utilizar métodos tecnológicos que nos possibilita mensurar variações espaciais e temporais, principalmente de variáveis que afetam o desenvolvimento da cultura e o rendimento da produtividade permitiria um aproveitamento dos recursos e uma minimização de custos.

Estudos como os realizados por Bottega et.al. (2013), ao analisarem a variabilidade espacial dos atributos químicos e da textura de um latossolo vermelho, em uma fazenda no município de Sidrolândia, Mato Grosso do Sul, onde se produzia algodão, soja e milho em uma amostra de 181 pontos em 90 hectares, com profundidade de 0,00 a 0,20 metros, não detectaram dependência espacial para os atributos acidez ativa em água, alumínio, acidez potencial, saturação por bases e matéria orgânica. As melhores estimativas de valores para locais não amostrados foram observadas para os atributos físicos do solo.

Campos et al. (2007), investigaram as relações solo-paisagem em um litosequência de transição arenito-basalto e a similaridade dos limites de superfície geomórficas. Foram mapeados no campo com limites a partir de técnica geoestatística, no município de Pereira Barreto, São Paulo. Foram coletados 67 pontos amostrais, nas profundidades de 0,0-0,25 m e

de 0,80-1,00 m, as amostras foram analisadas quanto a densidade do solo, textura, cálcio, potássio, magnésio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e pH. A análise individual dos atributos de três superfícies geomórficas e o uso de geoestatística permitiu confirmar que os atributos do solo apresentam limites próximos aos das superfícies geomórficas.

Souza et. al. (2004), em um estudo realizado em Guariba, São Paulo, na tentativa avaliar a variabilidade espacial do pH, cálcio, magnésio e saturação por bases em um latosso vermelho eutroférico, utilizando métodos estatísticos clássicos, análise geoestatística e técnica de interpolação. Foram coletados 206 pontos nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,6-0,8 m. Os maiores alcances foram observados na profundidade de 0,0-0,2m para todos os atributos estudados, com exceção do cálcio que apresentou comportamento inverso, refletindo os efeitos do maior grau de intemperismo natural dos solos.

Já Liao et. al. (2017), em estudo do espaço temporal, como variáveis de umidade do solo em duas colônias, Tea Garden e Forest Hillslope, solos contrastantes, na área do lago Taihu na China. Os dados de umidade do solo foram coletados na profundidade de 0-20 centímetros em 39 amostras. A umidade do solo em Forest hillslope mostrou uma dependência espacial mais forte ($r^2=0,753$) quando comparado com o Tea Garden ($r^2 = 0,459$). No entanto, a umidade do solo em ambos os montes mostrou dependência temporal semelhante e uma estrutura de autocorrelação moderada.

Diante de tais estudos, levando em consideração a estreita relação que existe entre o tempo e o espaço em estudo agrônômicos, uma tentativa de correlacionar dados de sensores orbitais no espaço e no tempo que possuem boas correlações com dados in situ pode ser uma excelente alternativa na descrição de variações da cultura do algodoeiro.

2.7 Satélite Landsat 5

O sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat-5 é um radiômetro imageador multiespectral com sete bandas espectrais, com resolução espacial de 30 metros para as bandas do visível (bandas 1, 2 e 3), infravermelho próximo (banda 4), e infravermelho de ondas curtas (banda 5 e 7), e de 120 metros para a banda 6 - infravermelho termal. Sua resolução temporal é de 16 dias, o que dificulta a obtenção de imagens sem incidência de nuvens durante o período chuvoso, coincidente com o crescimento das principais culturas agrícolas. A Tabela 1 apresenta as características do sensor.

Tabela 1. Características das bandas dos sensores a bordo do satélite Landsat 5.

Bandas Landsat 5 – TM	Comprimento de onda (µm)	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica	Área Imageada
B1-Visível Azul	0,45 - 0,52	30m	16 dias	8 bits	185km ²
B2-Visível Verde	0,50 - 0,60				
B3-Visível Vermelho	0,63 - 0,69				
B4-Infravermelho Próximo	0,76 - 0,90				
B5-Infravermelho Médio	1,55 - 1,75				
B6-Infravermelho Termal	10,4 - 12,5	120m			
B7-Infravermelho Médio	2,08 - 2,35	30m			

Fonte: Adaptado do INPE, (2019).

Os dados do programa Landsat 5 tornaram-se extremamente integrados nas aplicações de observação e monitoramento da Terra, particularmente na última década (Wulder et al., 2012, Turner et al., 2015). Este aumento recente deve em parte à cobertura gratuita e global do Landsat. Quando os dados do Landsat se tornaram disponíveis gratuitamente em 2009, no *United States Geological Survey* (USGS) viu um aumento anual de 50 vezes nos downloads de imagens (Miller et al., 2011). O arquivo de imagem em constante expansão do programa Landsat é um conjunto de dados inestimável para monitoramento ecológico, planejamento agrícola, detecção de mudanças do solo e conservação da biodiversidade (Kennedy et al., 2014, Turner et al., 2015, Vogelmann et al. 2016).

2.8 Sensoriamento remoto no estudo de dados Landsat

Estudos de monitoramento contínuo da expansão agrícola tem sido realizado em sua maioria com a utilização de imagens de sensores de acervo gratuitas.

Tatsumi et al. (2015), ao investigar métodos novos de classificação utilizando imagens do Landsat, o algoritmo Random Forest, e índices de vegetação (EVI), analisou oito classes: alfafa, aspargos, abacate, algodão, uva, milho, manga e tomate. A avaliação foi baseada em vários critérios: sensibilidade ao tamanho do conjunto de dados de treinamento, número de variáveis e precisão de mapeamento. Os resultados mostraram que o tamanho do conjunto de dados de treinamento afeta fortemente a precisão do classificador, mas se os dados de

treinamento aumentarem, a taxa de melhoria diminui. Obtiveram mapas com uma precisão global de 81%, e destaca que a utilização do índice de vegetação foi uma variável importantes para separação das diferentes culturas analisadas.

Outra pesquisa utilizando imagens da série Landsat 5 foi realizada por Parente et al. (2017), utilizaram as imagens no monitoramento das pastagens brasileiras do ano de 2015. Foram obtidas dezenas de métricas sazonais, para produzir, através de critérios objetivos e estratégias de classificação automatizada, resultando em um mapa de pastagens do Brasil. Com base no algoritmo Random Forest, individualmente modelado e aplicado a cada uma das 380 cenas Landsat cobrindo o território brasileiro, obtiveram um mapa com precisão global de 87%, considerado satisfatório levando em consideração o tamanho da área de estudo.

As imagens adquiridas pelos sensores Landsat estão sujeitas a distorções como resultado dos efeitos sensoriais, solares, atmosféricos e topográficos. O pré-processamento tenta minimizar esses efeitos na medida desejada para uma aplicação específica. Os produtos do Level-1 fazem parte dos dados da Collection 1 processados sistematicamente pelo USGS para níveis padronizados com base na qualidade dos dados e no nível de processamento. Os produtos Landsat Level-1 são entregues como números digitais, que podem ser convertidos em unidades absolutas de radiação ou reflectância (USGS, 2016).

A normalização radiométrica é desejável para remover as variações de cena para cena, e permitir a amostragem de cobertura de terra padronizada através de cenas. As condições atmosféricas e as inconsistências da superfície impedem a normalização da imagem, e os modelos de classificação padrão particularmente em grandes áreas. Assim, ajustes radiométricos são necessários para explicar as condições atmosféricas variáveis (FLOOD et al., 2013).

Segundo Vermote (1997), o método de correção atmosférica 6s (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) é uma modificação melhorada do método 5s (Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum). Esse método foi elaborado para modelar os seguintes parâmetros atmosféricos: modelos estatísticos baseados nas bandas de absorções atmosféricas, modelagem de várias funções atmosféricas para um tratamento completo do processo de espalhamento, e um tratamento aproximado de interação entre os dois efeitos atmosféricos (LATORRE et al., 2002). Os parâmetros de entrada para a correção atmosférica são: as configurações das condições geométricas do satélite, dia, mês, latitude e longitude, modelo atmosférico, visibilidade horizontal, altura em relação ao alvo, sensor abordo do satélite e banda espectral.

Com relação aos estudos de correções atmosféricas espectrais em imagens do sensor TM5, Fragal et al. (2011), ao comparar métodos de correção atmosférica observaram que o método 6s mostrou grande eficiência na caracterização do comportamento espectral da vegetação queimada e não queimada em comparação com o método DOS, o que ocorre porque este método considera a dispersão, absorção atmosférica, e as condições de aquisição da imagem.

REFERÊNCIAS

ABRAPA – Associação Brasileira dos produtores de algodão. Sistema de Informações de Negócios com Algodão em Pluma. **Resumo de vendas realizadas pelo produtor**, 2018.

ABREU, S. L. D.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. D; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo e da produtividade e qualidade de grãos de trigo agroecológico em argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, p. 275 - 282, 2003.

AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; DUIVENVOORDEN, J. F. Otimizando a precisão da classificação da cobertura do solo para detecção de alterações, uma abordagem combinada baseada em pixels e baseada em objetos em uma área montanhosa no México. **Geografia Aplicada**, v.34, p.29-37. 2012.

BENGOUGH, A. G.; Gao, W.; Ren, T.; Auneau, L.; Watts, C. W.; Whalley, W. R. Predicting penetrometer resistance from the compression characteristic of soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, 361–369, 2011.

BENNETTA, J. M.; STIRLING, D. R.; TROY. A. J.; DIOGENES, L. A.; JAKE, H. B. A comparative study of conventional and controlled traffic in irrigated cotton: I. Heavy machinery impact on the soil resource. **Soil & Tillage Research**, v. 168, p. 143 – 154, 2017.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; CARVALHO-PINTO, F. A.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Rev. Ciênc. Agron., Fortaleza**, v. 44, n. 1, p. 1-9, Mar. 2013

BRAUNACK, M. V.; D.B. JOHNSTON. Changes in soil cone resistance due to cotton picker traffic during harvest on Australian cotton soils. **Soil & Tillage Research**, v. 140, p. 29 – 39, 2014.

CAMPOS, M. C. C.; Pereira, T. G.; Montnari, R.; Camargos, A. L. Relações solo-paisagem em uma litosseqüência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **R Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p.519-529, 2007

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 14:133-142, 1990.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. A cultura do algodão: Análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos-safra 2006/07 a 2016/17. **Compêndio de estudo**, v.8, 2017.

CONRAD, C.; RAHMANN, M.; MACHWITZ, M.; STULINA, G. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan. **Global and Planetary Change**, v. 110, p. 88-98, November 2013.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.28, n. 6, p. 1013-1021, 2006.

CORRÊA, A. N.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo. **Ciências Agrárias**, v.30, n.1, p. 81-94, 2009.

CORTEZ, J. W.; FERREIRA, B. J. M.; OLSZEWSKI, N.; LOPES, H. L.; DE JESUS N. H. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Argissolo Amarelo no semiárido nordestino. **Nucleus**, v. 7, n. 2, 2010.

CRESTANA, S., FRAGALLE, E. P. A trilha da quinta potência: um primeiro ensaio sobre ciência e inovação, agricultura e instrumentação agropecuária brasileiras. **Revista Eixo**, v. 1, n. 1, p. 7-19, 2012.

DEININGER, K., BYERLEE, D. The rise of large farms in land abundant countries: do they have a future? **The World Ban**. V. 40, p. 701–714, 2012.

DUHAN, J. S.; KUMAR, R.; KUMAR, N.; KAUR, P.; NEHRA, K.; DUHAN, S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. **Biotechnology Reports**, v.15, p.11-23, 2017.

FENG, L.; DAI, J. L.; TIAN, L. W.; ZHANG, H. J.; LI, W. J.; DONG, H. Z. Review of the technology for high-yielding and efficient cotton cultivation in the northwest inland cotton-growing region of China. **Field Crops Res**, v. 208, p. 18–26, 2017.

FLOOD, N.; DANAHER, T.; GILL, T.; GILLINGHAM, S. An operational scheme for standardised surface reflectance from Landsat TM/ETM+ and SPOT HRG imagery for Eastern Australia. **Remote Sensing**, v.5, p.83–109, 2013.

MELLOR, A.; HAYWOOD, A.; STONE, C.; JONES, S. The performance of Random Forests in an Operational Setting for Large Area Sclerophyll Forest Classification. **Remote Sensing**, v. 5, n.6, 2838–2856, 2013.

FRAGAL, E. H.; MONTANHER, O. C. **Correções atmosféricas 6s e DOS na caracterização espectral de alvos naturais de Ilha Grande utilizando dados do sensor TM 5**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE, p.7456, maio 2011.

FRITZ, S., SEE, L., YOU, L., JUSTICE, C., BECKER-Reshef, I., BYDEKERKE, L., CUMANI, R., DEFOURNY, P., ERB, K., FOLEY, J., GILLIAMS, S., Gong, P., HANSEN,

M., HERTEL, T. The need for improved maps of global cropland. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v.94, n.3, p. 31-32, Agu 2013.

GALVÃO, L., S.; FORMAGGIO, A., R.; BREUNIG, F., M. Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, INPE, p. 1095-1102, 2009.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. D. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1234-1244, 2014.

GONZALEZ-DUGO, V.; ORGAZ F.; FERERES E. Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. **Scientia Horticulturae**, v.114, n.2, p. 77-82, 2007.

GOVAERTS, B.; MEZZALAMA, M.; UNNO, Y.; SAYRE, K.D.; GUIDO, M.L.; VANHERCK, K.; DENDOO VEN, L.; DECKERS, J. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity. **Applied soil ecology**, v.37, p.18-30, 2007.

HILL, M. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: an analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 94-111, 2013

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagens LANDSAT TM e ETM+. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php>. Acesso: jan. 2020.

INPE, **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Series View**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/series>> Acesso: jan. 2020.

KENNEDY, R. E.; ANDRÉFOUËT, S.; COHEN, W. B.; GÓMEZ, C.; GRIFFITHS, P.; HAIS, M. Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.12, p.339–346, 2014.

KUEMMERLE, T.; ERB, K.; MEYFROIDT, P.; MÜLLER, D.; VERBURG, P.H.; ESTEL, S.; HABERL, H.; HOSTERT, P.; JEPSEN, M.R.; KASTNER, T.; LEVERS, C.; LINDNER, M.; PLUTZAR, C.; VERKERK. Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. **Current opinion in environmental sustainability**, v. 5, n. 5, p. 484-493, 2013.

LATORRE, M.; CARVALH, J. O. A., CARVALHO, A. P. F., SHIMABUKURO, Y. E. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 153–178, 2002.

LIAO, K.; LAI, X.; ZHOU, Z.; ZHU, Q. Applying fractal analysis to detect spatio-temporal variability of soil moisture content on two contrasting land use hillslopes. **Catena**, v. 157, p. 163-172, 2017.

LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., CHIPMAN, J.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**, sixth ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2008.

MA, X.; HUETE, A.; YU, Q.; COUPE, N. R.; DAVIES, K.; BROICH, M.; RATANA, P.; BERINGER, J.; HUTLEY, L.B.; CLEVERLY, J.; BOULAIN, N.; EAMUS, D. Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian tropical transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 97-115, 2013

MARUR, C. J.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista de Oleaginosas e Fibrosa**, v.5, n.2, p. 313-317, 2010.

MASSEY, R.; SANKEY, T. T.; CONGALTON, R. G.; YADAV, K.; THENKABAIL, P. S.; OZDOGAN, M.; SÁNCHEZ-MEADOR, A. J. MODIS phenology-derived, multi-year distribution of conterminous U.S. crop types. **Remote Sensing of Environment**. 1v.98, p. 490–503, 2017.

MENKE, A. B.; CARVALHO, J. O. A. D.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, É. D. S., OLIVEIRA, S. N. D. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luís Eduardo Magalhães (BA-Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 21, n.3, p. 315-326, 2009.

MILLER, R. F., KNICK, S. T., PYKE, D. A., MEINKE, C. W., HANSER, S. E., WISDOM, M. J., & HILD, A. L. **Characteristics of sagebrush habitats and limitations to long-term conservation. Greater sage-grouse: ecology and conservation of a landscape species and its habitats. Studies in Avian Biology**, v.38, p.145-184, 2011.

MOLIN, J. P., DIAS, C. T. S., & CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, 584-590, 2012.

O'CONNOR, B.; DWYER, E.; CAWKWELL, F.; EKLUNDH, L. Spatio-temporal patterns in vegetation start of season across the island of Ireland using the MERIS global vegetation index. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 68, p. 79-94, 2012.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of cotton plant. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. dos. (Ed.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, p. 35-55, 1999.

PARENTE, L., FERREIRA, L., FARIA, A., NOGUEIRA, S., ARAÚJO, F., TEIXEIRA, L., HAGEN, S. Monitoring the brazilian pasturelands: A new mapping approach based on the landsat 8 spectral and temporal domains. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.62, p. 135–143, 2017.

PRASAD, A.K.; Chai, L.; Singh, R.P.; Kafatos, M. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, n. 1, p. 26-33, 2006.

RAMIREZ, B, M. **Monitorando os níveis de nitrogênio no dossel de algodão usando a detecção espectral de iluminação ativa em tempo real**. Tese de mestrado, Universidade do Tennessee, 2010.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.

ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. POTAFOS: **Informações Agrônomicas** N° 95, 9p, 2010.

SILVA, J. M.; PASSOS, A. L. R.; BELTRÃO, F. A. S. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 3, 2010.

SILVA, L. M. M. M. **Caracterização de culturas para controle agrícola através de análise multitemporal de imagens de satélite**. Tese em Engenharia Geográfica UNIVERSIDADE DE LISBOA, 2015.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S.. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em parcelas experimentais em um Argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.399- 406, 2004.

SILVA, I. P. F.; JUNIOR, J. F. S.; ARALDI, R.; TANAKA, A. A.; GIROTTO, M.; BOSQUÊ, G. G.; LIMA, F. C.C. ESTUDO DAS FASES FENOLÓGICAS DO ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 10, n. 20, p. 1 – 10, 2011.

SOUZA, Z.M.; JUNIOR, M. J.; PEREIRA, T. G.; MOREIRA, F. T. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana de açúcar. **Ciência Rural**, v.34, p.1763-1771, 2004.

TATSUMI, K.; YOSUKE Y.; MIGUEL A. C. T.; CAYO, L. R. T. Crop classification of upland fields using Random forest of time-series Landsat 7 ETM+ data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 115, p.171-179, July 2015.

TREVISAN, V. **Avaliação dos atributos físicos de um complexo de solos hidromórficos sob diferentes sistemas de manejo**. 114f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, 2005.

TURNER, W.; RONDININI, C.; PETTORELLI, N.; MORA, B.; LEIDNER, A. K.; SZANTOI, Z.; KOH, L. P. Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. **Biological Conservation**, v.182, p.173–176, 2015.

VALLEJOS, M.; VOLANTE, J. N.; MOSCIARO, M. J.; VALE, L. M.; BUSTAMANTE, M. L.; PARUELO, J. M. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geo-database from 1976 to 2012. **Journal of Arid Environments**, v. 123, p. 3–11, 2015.

VERMOTE, E. F.; TANRÉ, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCETTE, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v.35, n.3, p. 675-686, 1997.

VOGELMANN, J. E.; GALLANT, A. L.; SHI, H.; ZHU, Z. Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data. **Remote Sensing of Environment**, v.185, p.258-270, 2016.

WULDER, M. A.; MASEK, J. G.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p.2–10, 2012.

YANG, C.; EVERITT, J. H.; MURDEN, D. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.75, n.2, p. 347-354, 2011.

Zhang, W.; Yang, Y.; Wang, Q. A study on software effort prediction using machine learning techniques. **In International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 1-15, 2013.

ZHAO, D. L.; REDDY, K. R.; KAKANI, V. G.; READ, J. J.; KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, v.26, p.335-344, 2007.

SEGUNDA PARTE – “ARTIGOS”

ARTIGO 1

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION INDICES IN MONITORING COTTON CULTURE.

Jefferson Francisco Soares¹, Marcelo de Carvalho Alves¹

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras
Caixa postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

Artigo preparado de acordo com as normas do periódico “*O ESPAÇO GEOGRAFICO
EM ANÁLISE*”

Versão Preliminar

Received 15 September 2019; Change request 11 January 2020.

Vol. 47, n° 1, 2020.

ANALISE ESPAÇO-TEMPORAL DE INDICES DE VEGETAÇÃO NO MONITORAMENTO DA CULTURA DO ALGODOEIRO.

RESUMO

O algodoeiro possui variações fenológicas importantes que influenciam no comportamento espectral e podem ser interpretados, consequentemente auxiliando diretamente no manejo da cultura. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar as principais alterações da fenologia do algodoeiro sobre o cultivar 966 Bayer Fiber Max®, por meio de diferentes índices de vegetação em um ciclo completo da cultura entre os meses de fevereiro a setembro de 2009. As imagens processadas para os índices de vegetação propostos permitiram detectar e separar os diferentes estágios da cultura do algodoeiro. As informações da cobertura vegetal em todos os meses da cultura, mostraram as mudanças de vegetação com base nos resultados dos índices de vegetação. O monitoramento temporal revelou que o melhor índice de vegetação para caracterização temporal foi EVI (0,939-maio/09, -0,704 agosto/09) que apresentou resultados condizentes com as fases fenológicas da cultura. O Índice de vegetação EVI ressaltou a influência da vegetação em seus valores, levando em consideração o conhecimento prévio da cultura. Assim, foi possível identificar e relacionar as alterações dos índices de vegetação do algodoeiro no espaço e no tempo, possibilitando interpretar os estágios vegetativos da cultura remotamente.

Palavra-chave: Algodoeiro, Fenologia, Geoprocessamento, Índice de Vegetação.

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION INDICES IN MONITORING COTTON CULTURE.

ABSTRACT

Cotton has important phenological variations that influence the spectral behavior that can be interpreted and consequently help directly in the management of the crop. Thus, the objective of this work was to analyze the main changes in cotton phenology on the cultivar 966 Bayer Fiber Max®, by means of different vegetation index in a complete cycle of the crop between the months of February and September of 2009. The images processed for the proposed vegetation index allowed to detect and separate the different stages of the cotton crop. The vegetation cover information in all months of the crop showed the vegetation changes based on the results of the vegetation indexes. The temporal monitoring revealed that the best vegetation index for temporal characterization was EVI (0,939-May / 09, -0,704 August / 09), which presented results consistent with the phenological phases of the crop. The EVI vegetation index emphasized the influence of the vegetation on its values, taking into account the previous knowledge of the crop. Thus, it was possible to identify and relate the changes in the vegetation indices of the cotton in space and time, making it possible to interpret the vegetative stages of the crop remotely.

Key words: Cotton, Phenology, Geoprocessing, Vegetation Index.

1. INTRODUÇÃO

O algodão está entre as mais importantes culturas de fibras do mundo, sendo produzido por mais de 60 países, nos cinco continentes. Todos os anos, uma média de 35 milhões de hectares de algodão são plantados em todo o planeta, movimentando anualmente no comércio mundial cerca de US\$ 12 bilhões (ABRAPA, 2018). O Brasil segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) entre os anos safra de 2006/07 a 2016/17, foi o quinto maior produtor mundial de algodão em pluma. Nesse mesmo período, a maior participação na produção nacional foi registrada para o estado do Mato Grosso com 67,1% do total produzido. Contudo, a produção de algodão nacional na safra 2015/2016 atingiu seu menor valor nos últimos 10 anos. Estudos que possam minimizar os custos operacionais estão sendo constantemente avaliados na expectativa de que seja relevante, uma vez que, estes valores são significativos perante o custo de produção.

Com o sensoriamento remoto pode-se realizar uma análise da vegetação de forma processual, possibilitando identificar eventos específicos no tempo e no espaço. Existem diversas técnicas para monitorar a vegetação e detectar alterações. Contudo, na prática, a seleção do método mais adequado não é fácil, sendo o objetivo da análise e a área de estudo fatores decisivos na sua escolha.

Conrad et al. (2013), investigaram o método de distribuição de culturas irrigadas de algodão e trigo no Vale de Fergana, no sudeste do Uzbequistão, utilizando imagens dos sensores Landsat e RapidEye adquiridas antes do início das principais fases de irrigação. Os recursos extraídos dos dados dos satélites foram as bandas espectrais (RapidEye:1-5, Landsat: 1-6) e os índices de vegetação (NDVI, EVI, SAVI). As classificações alcançaram uma precisão geral de 86,2%, apresentando um alto desempenho para algodão onde a precisão do produtor alcançou 95% (usuário 89%) na matriz de confusão.

Uma aplicação atual é a utilização de dados em série temporal e a detecção de diferentes tipos de culturas e suas respectivas fenologias, como foi realizado por Massey et. al. (2017), ao utilizarem dados do sensor de baixa resolução espacial na elaboração de séries temporais para diferentes culturas a partir do zoneamento agrícola determinado pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Utilizando produtos de índices de vegetação gerados com imagem do sensor MODIS, foi possível identificar diferentes culturas pelos limiares máximos e mínimos de respostas ao índice de vegetação NDVI, dentre elas a cultura

do algodão. Dessa maneira foi realizado o mapeamento automatizado e rotineiro de culturas sem uma coleta repetida e dispendiosa de amostras de campo ano após ano.

Durante a maior parte do ciclo da planta de algodão há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação de frutos. Cada um destes eventos é importante para a produção final, mas é necessário que eles ocorram de modo balanceado (OOSTERHUIS, 1999).

De acordo com Rosolem (2010), o ciclo fenológico do algodoeiro pode ser dividido em fases de crescimento e alguns processos característicos da cultura definem cada uma destas fases. A primeira fase é descrita como estágio vegetativo (F1), ocorre entre a emergência da plântula até a formação da primeira folha verdadeira (>2,5cm), seguido pela segunda fase, que é o estágio de formação de botões florais (F2), que se mantém até a abertura da primeira flor considerada terceira fase (F3), e assim sucessivamente até a abertura do primeiro capulho (F4), trado com a quarta fase. Alguns autores ressaltam que com a padronização da cultura do algodoeiro dessa forma, torna-se fácil comparar os dados com outros trabalhos de pesquisas realizados em diversas localidades (ROSOLEM, 2010; MARUR & RUANO, 2010).

No entanto, conjuntos de dados especialmente mapas de cobertura de terra agrícola, ainda apresentam falhas de precisão e detalhes (FRITZ et al., 2013). Informações que descrevem a agricultura além da área, como intensificação agrícola estão especialmente ausentes (KUEMMERLE et al., 2013). Os mapas de cobertura terrestre que descrevem a área agrícola não são suficientes para melhorar a nossa compreensão da rápida mudança de produtos agrícolas (VALLEJOS et al., 2015).

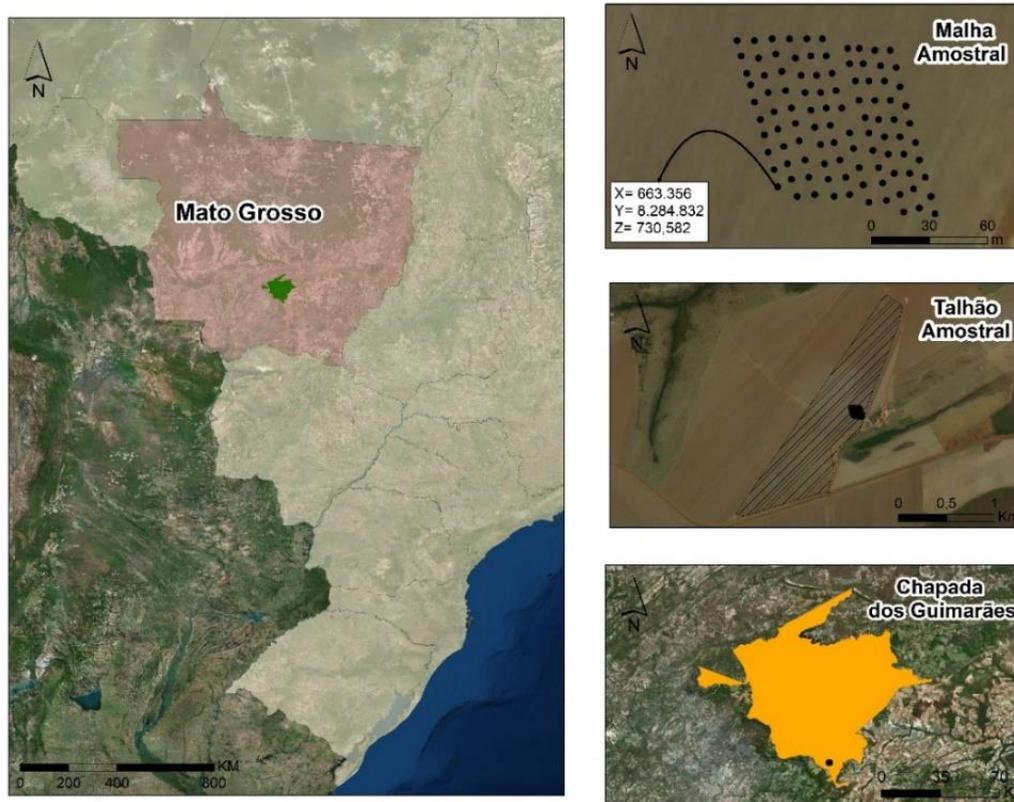
A cultura do algodoeiro possui variações fenológicas que podem ser monitoradas por radiômetro orbital de alta resolução temporal e espacial e é possível caracterizar a magnitude e a estrutura da dependência espacial do algodoeiro utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Desta forma o objetivo desta pesquisa foi utilizar dados do satélite Landsat 5 na caracterização espaço temporal do algodoeiro em um agrossistema variável, utilizando diferentes índices de vegetação para tal, propondo métodos replicáveis, acessíveis e de baixo custo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1.Área de estudo

A área de estudo está localizada no estado do Mato Grosso, no município Chapada dos Guimarães, em uma cultura de algodoeiro na fazenda Ouro Branco, que contempla uma área

amostral de 8.000 m², com centroide localizado nas coordenadas UTM 21L 663.385m 8.284.868 m (Figura 1).



Fonte: Do autor (2019).

Figura 1 – Definição do arranjo espacial da malha amostral composta por 100 pontos georreferenciados, delimitação do talhão onde se encontra e a delimitação do município Chapada dos Guimarães.

Levando em consideração à cultura do algodoeiro, a região da Chapada dos Guimarães possui condições edafoclimáticas totalmente favoráveis. O clima da região de acordo com a classificação Köppen-Geiger é temperado e úmido com invernos secos (Tipo Aw), que no geral se distingue por duas estações uma seca e outra chuvosa, com precipitação máxima de 1.500 mm anuais, ideal para a rotação de culturas como a soja e algodão que exigem uma precipitação que varie de 500 a 1600 mm. O algodoeiro especificamente requer calor e umidade no solo para completar seu ciclo vegetativo, devendo o final do ciclo coincidir com o período seco.

As temperaturas anuais da região com médias anuais máximas variando de 35°C a 38°C, enquanto as anuais mínimas variam de 19°C a 21°C. De acordo com Silva et al. (2011), a faixa de temperatura para a germinação do algodoeiro está entre 25 °C e 30 °C. Na fase de

crescimento vegetativo, a faixa ideal está entre 27 °C e 32 °C. Assim, o ponto ótimo de temperatura para o desenvolvimento do algodão está entre 20°C e 35°C, isto porque, nessa faixa o processo de germinação é acelerado resultando em uma emergência mais rápida da planta.

O relevo que é em sua maior parte plano ou levemente ondulado favorece a movimentação de máquinas agrícolas no plantio e na colheita. O solo foi classificado como latossolo de textura muito argilosa e a luminosidade atinge no verão aproximadamente 13 horas de luz com o nascer do sol às 5:25 e o pôr do sol às 18:30.

No Mato Grosso o plantio da cultura do algodoeiro vai de novembro até fevereiro e a colheita acontece em junho se estendendo até agosto. O algodoeiro possui uma legislação para o vazio sanitário, que é um período em que o produtor não deve ter em sua lavoura plantas vivas da cultura, esta medida visa proteger a produção do estado de prejuízos ocasionados por diferentes tipos de praga específicos da cultura do algodoeiro.

2.2.Coleta de dados in situ

A área amostral para locação dos pontos compreendeu uma malha irregular de 100 pontos georreferenciados, todos coletados utilizando GPS geodésico Topcon Hiper, envolvendo uma área de 8.000m² dentro do talhão da cultura.

2.3.Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV) foram propostos de acordo com as literaturas pesquisadas para que fosse possível analisar as características da área de estudo em diferentes abordagens, como análises da condição da vegetação, interferência do solo, presença de água na vegetação e análise de indicador de biomassa.

Todos os IV foram calculados automaticamente e também programados em rotina Python. Os valores para área de estudo foram extraídos pela sobreposição da malha amostral de 100 pontos georreferenciados. Os IV propostos foram o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Índice de Área Foliar (IAF) e Enhanced Vegetation Index (EVI), e os cálculos para obtenção dos valores dos IV estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Índice de vegetação propostos, suas respectivas equações e descrição das bandas espectrais utilizadas para cada índice de vegetação.

Índice de Vegetação	Equação para Obtenção do Índice de Vegetação	Descrição das Bandas Espectrais e Respective Coeficientes
NDVI	$= \frac{IVP - V}{IVP + V}$	IVP: Reflectância na banda do infravermelho próximo; V: Reflectância na banda do vermelho.
NDWI	$= \frac{IVP - IVM}{IVP + IVM}$	IVM: Reflectância na banda do infravermelho médio (B5).
SAVI	$= \frac{(1 + L_s) \times (IVP - V)}{(L_s + IVP + V)}$	L _s : Fator de ajuste do índice SAVI; V: Reflectância na banda do vermelho.
IAF	$= \frac{\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$	SAVI: valor do IV SAVI
EVI	$= G \times \frac{IVP - V}{IVP + C_1 \times V - C_2 \times A + L}$	A: Reflectância na banda do azul C ₁ : Coeficiente de correção da banda do vermelho (=6) C ₂ : Coeficiente de correção da banda do azul (=7,5) L: Fator de correção para a interferência do Solo (=1) G: Fator de Ganho (=2,5)

Fonte: Boratto (2013).

No total foram analisados 30 produtos, resultantes dos índices de vegetação calculados da área amostral. A Tabela 04 apresenta uma síntese dos dados que foram processados. Ao todo foram coletados 500 valores mensais e 3.000 valores totais para análise dos índices de vegetação no período de estudo.

Tabela 4: Data de obtenção das imagens do satélite Landsat 5 da área de estudo, data do processamento dos índices de vegetação e quantificação dos pontos avaliados.

Mês	Data da cena	Data do processamento	Índices de vegetação	Pontos amostrais	Dados Coletados
Abril	16/04/2009	15/11/2017	5	100	500
Maio	18/05/2009	16/11/2017	5	100	500
Junho	03/06/2009	16/11/2017	5	100	500
Julho	21/07/2009	16/11/2017	5	100	500
Agosto	06/08/2009	16/11/2017	5	100	500
Setembro	07/09/2009	16/11/2017	5	100	500
Total			30	500	3.000

Fonte: Do autor (2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após analisar os valores radiométricos e sua relação com o desenvolvimento da cultura do algodoeiro, iniciou-se o estudo dos IV propostos para o acompanhamento da cultura do algodoeiro. Na Tabela 9 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva dos índices de vegetação NDWI, NDVI, SAVI, IAF e EVI nos meses que sucederam o estudo.

Tabela 9: Estatística descritiva dos índices de vegetação propostos na cultura do algodoeiro.

	Nº de Observações	Mínimo	Máximo	Média	DP	Variância
NDWI	100	-0,21	0,48	0,28	0,28	0,08
EVI	100	-0,63	0,87	0,42	0,62	0,39
NDVI	100	0,23	0,87	0,71	0,27	0,07
IAF	100	-0,63	1,15	0,70	0,76	0,58
SAVI	100	0,35	1,31	1,07	0,41	0,17

Fonte: Do autor (2018).

A análise dos IV, através das curvas espectrais da cultura do algodoeiro, e pelos resultados dos índices propostos é possível fundamentar algumas relações baseando-se nas quatro fases distintas do crescimento vegetativo, que de acordo com Rosolem (2010) são o estágio de crescimento vegetativo (F1), aparecimento dos botões florais (F2), abertura dos botões florais (F3) e a abertura dos capulhos (F4).

O índice NDWI (Figura 2) foi proposto para analisar a variação de acordo com o teor de água presente na vegetação, utilizando das bandas do infravermelho médio e próximo. Foi possível notar a diferença dos valores obtidos (Figura 7-a) pelo índice na fase crescimento vegetativo (F1) da cultura (abril), quando seu ápice de desenvolvimento vegetativo (F2 e F3), apresenta maior biomassa e material vegetal fotossinteticamente ativo, conseqüentemente maior presença de água na vegetação (maio e junho), um declínio acentuado (julho), podendo ser relacionado com o aumento de matéria seca da vegetação, abertura das flores, apresentada pela cultura ou até mesmo pelo período seco como será mostrado posteriormente no estudo de precipitação para a região da área de estudo. E conseqüentemente, chegando aos valores negativos do índice (agosto), quando no manejo do algodoeiro, ocorre o desfolhamento que precede a colheita, técnica utilizada para a melhoria na qualidade da fibra do algodão, pois

reduz a umidade, o amarelamento, impureza e incidência de manchas na fibra do algodão. Finalizando o ciclo da cultura, o mês de setembro apresenta valores negativos do índice, uma vez que, após a colheita o solo apresenta-se desnudo. Diferentes estudos elucidaram essa percepção, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), o aumento de material verde causa o aumento da reflectância na região do infravermelho próximo aumentando consequentemente o NDWI. Já para Gao (1996), quando se refere a valores negativos de NDWI são valores que correspondem à vegetação seca, enquanto valores positivos refere-se à vegetação verde.

O NDWI mostra-se sensível ao aumento de biomassa, quanto maior incidência de vegetação na cultura, maior é a reflectância no infravermelho próximo, refletindo no aumento do índice.

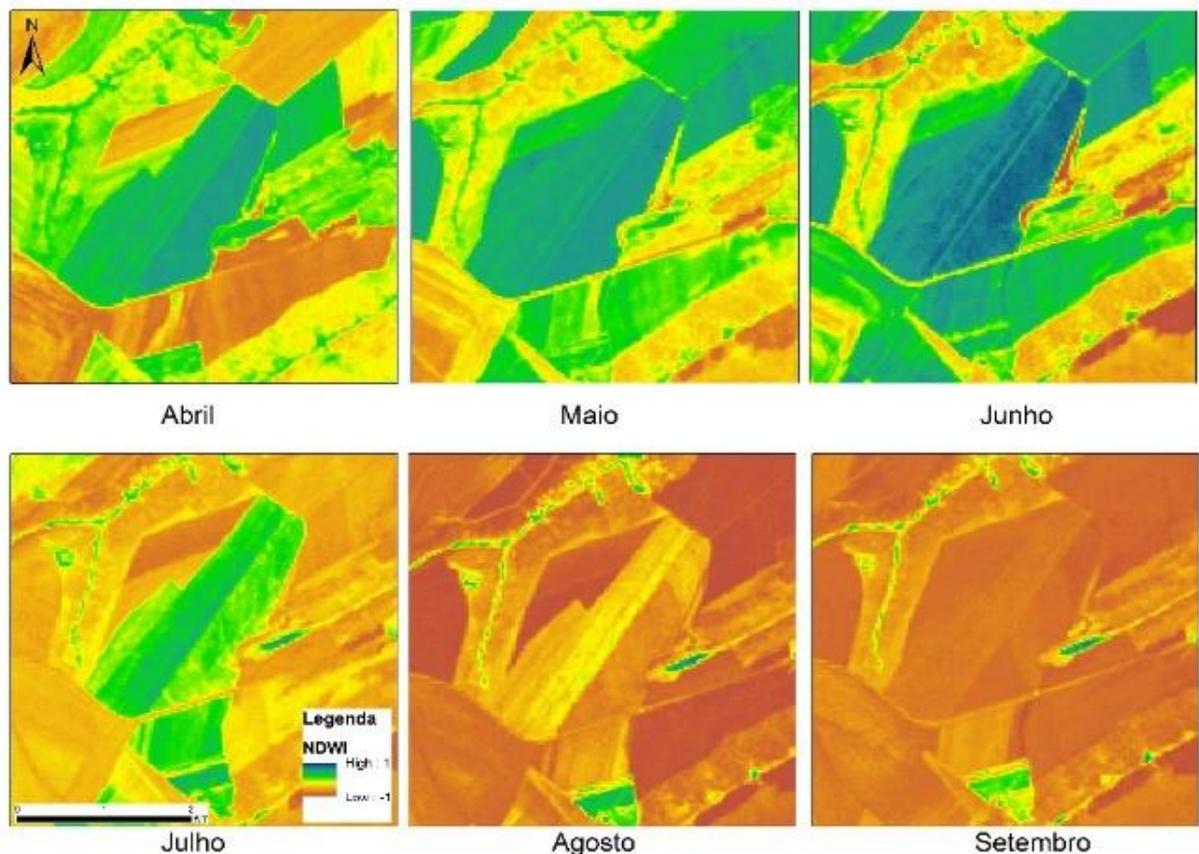


Figura 2 – Mapas dos produtos obtidos pelo Índices de Vegetação NDWI, distribuídos mensalmente a partir das imagens Landsat 5.

Para o índice NDVI (Figura 3), que foi proposto para analisar a condição da vegetação, empregando as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, os dados sofreram forte influência do solo em seus valores. Estes resultados são indesejáveis quando se pretende avaliar

parâmetros de crescimento vegetativo de uma cultura. Nas imagens obtidas é perceptível que o índice apresentou valores muito similares na fase de crescimento vegetativo (F1) e início da maturação (F2) da cultura do algodoeiro (abril, maio e junho). Loebmann et al. (2012,) julga este fato pela relação apresentada pelo infravermelho próximo e sua sensibilidade no mapeamento de feições geomorfológicas e estruturais do solo. Porém o índice mostrou-se perceptivo (Figura 7-b) para a baixa do vigor vegetal decorrente do aumento da matéria seca (F3) e o desfolhamento, podendo ser relacionado com a banda do vermelho, que está diretamente ligada a identificação de componentes clorofilados da planta. No mês de setembro, após a colheita, os valores baixos devem-se pela resposta do infravermelho próximo que tende a aumentar em todos os tipos de solo e diminuir no vermelho.

Para o presente estudo, o NDVI obteve dentre os índices propostos a menor influência sobre a mudança da vegetação, sendo observado uma rápida saturação, que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal nos estágios iniciais do desenvolvimento, ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando valores similares, mesmo com o aumento da densidade do dossel.

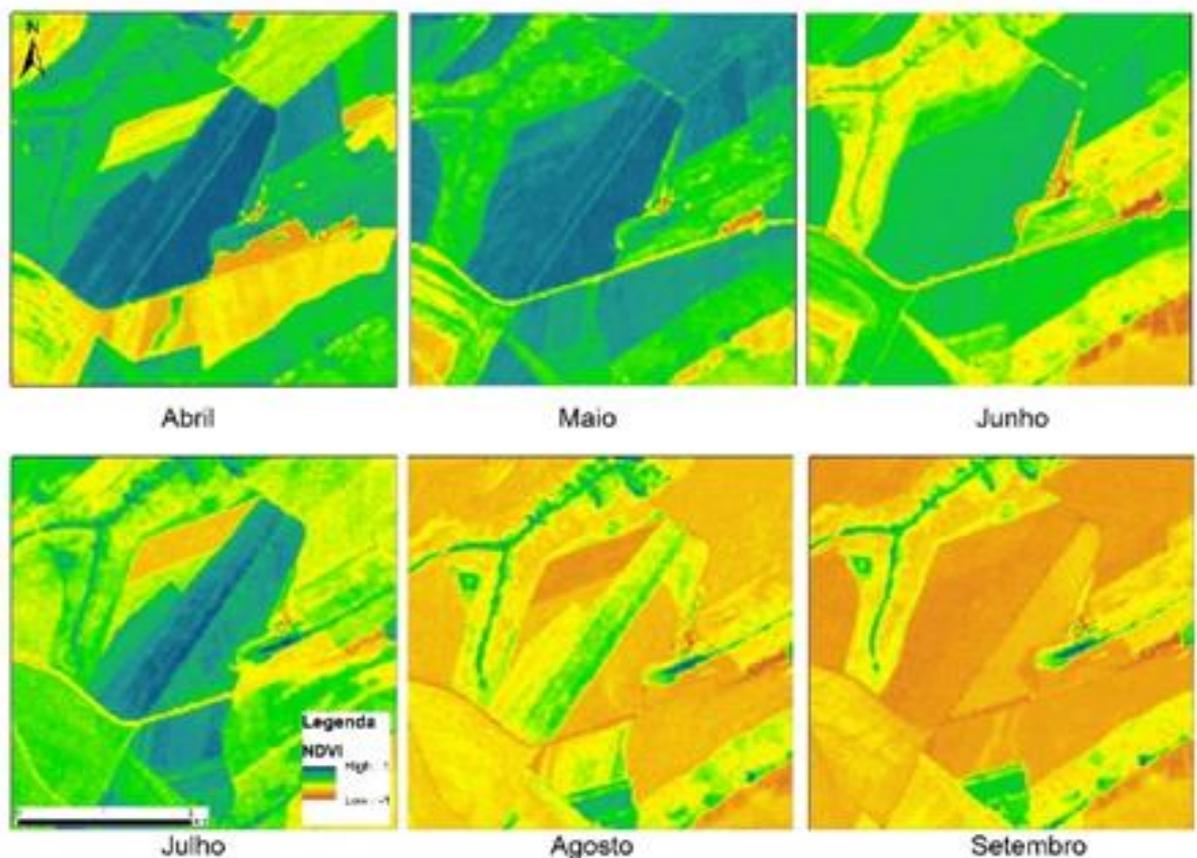


Figura 3 – Mapas dos produtos obtidos pelo Índices de Vegetação NDVI, distribuídos mensalmente a partir das imagens Landsat 5.

O Índice de Área Foliar (IAF) é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem. No mapa (Figura 4) é possível observar a intensidade dos pixels do IAF nos quatro primeiros meses que representa o crescimento vegetativo da cultura. Já o declínio dos valores que caracteriza a maturação da cultura, também pode ser relacionado ao aumento da matéria seca da planta, ou como será visto na análise dos dados de precipitação posteriormente, podendo ser decorrente dos períodos de baixa precipitação na área de estudo. Pode-se notar nas fases de crescimento vegetativo, o índice se expressou com maior amplitude (Figura 7-c), representando o vigor vegetativo da cultura (maior biomassa).

No mês de agosto, os valores negativos do índice decorrem da expressão do dossel da cultura do algodoeiro no estágio que antecede a colheita (F4) que se apresenta de forma esbranquiçada, enquanto, no mês de setembro os valores negativos representam apenas a resposta do índice para o solo desnudo.

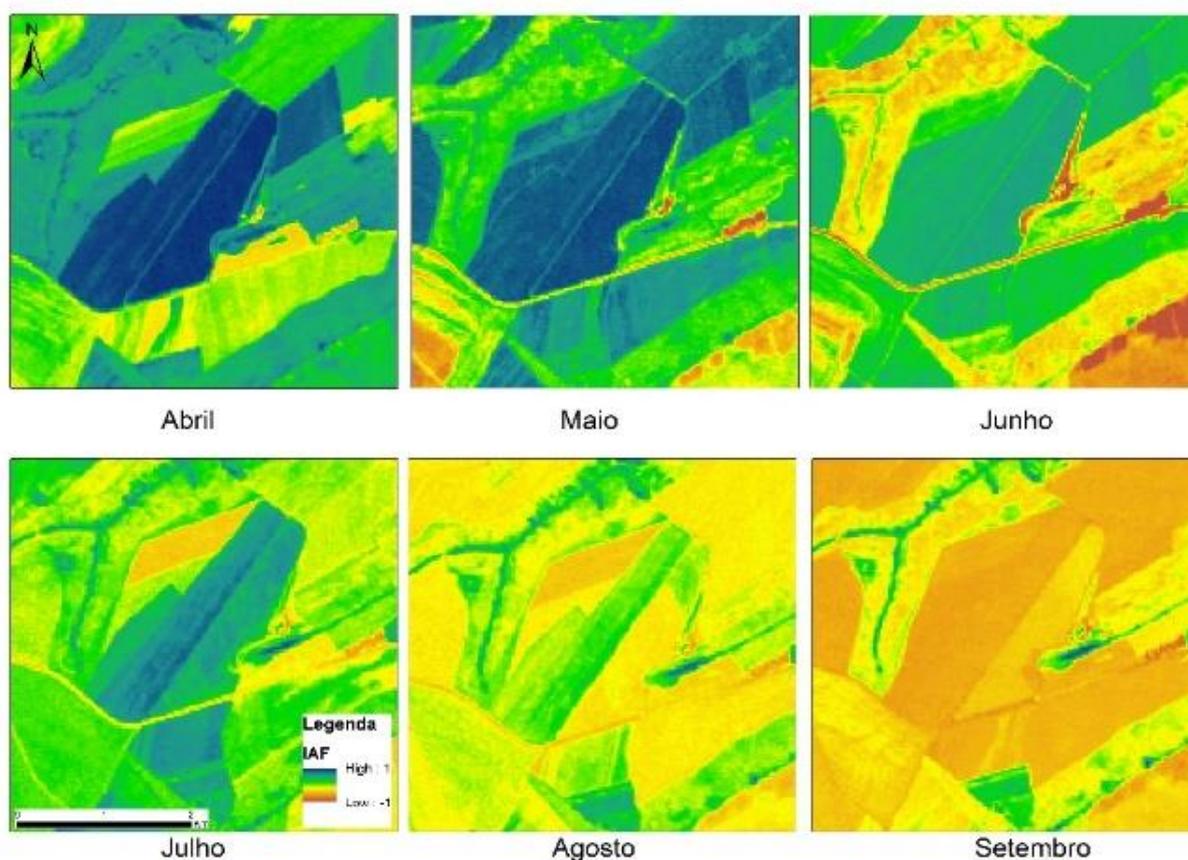


Figura 4 – Mapas dos produtos obtidos pelo Índices de Vegetação IAF, distribuídos mensalmente a partir das imagens Landsat 5.

O EVI, que propõe otimizar o sinal da vegetação, apresentou uma sensibilidade sobre a densidade de biomassa da cultura do algodoeiro semelhante ao NDWI. No mapa (Figura 5) fica visível o estágio de crescimento vegetativo (F1) onde se tem valores menores quando comparados aos valores do mês subsequente, representados pelos estágios de maturação (F2 e F3). Nestes estágios a maturação atingiu valores negativos no estágio que antecede a colheita da cultura em decorrência do desfolhamento (F4), valores que são relacionados ao material seco da vegetação da cultura e ao solo desnudo após a colheita, o EVI mostrou-se sensível ao aumento de biomassa dentro da cultura.

O índice mostrou-se mais adequado (Figura 7-d) na separação dos estágios iniciais mais densamente vegetados proporcionando o detalhamento desejado na representatividade da cultura.

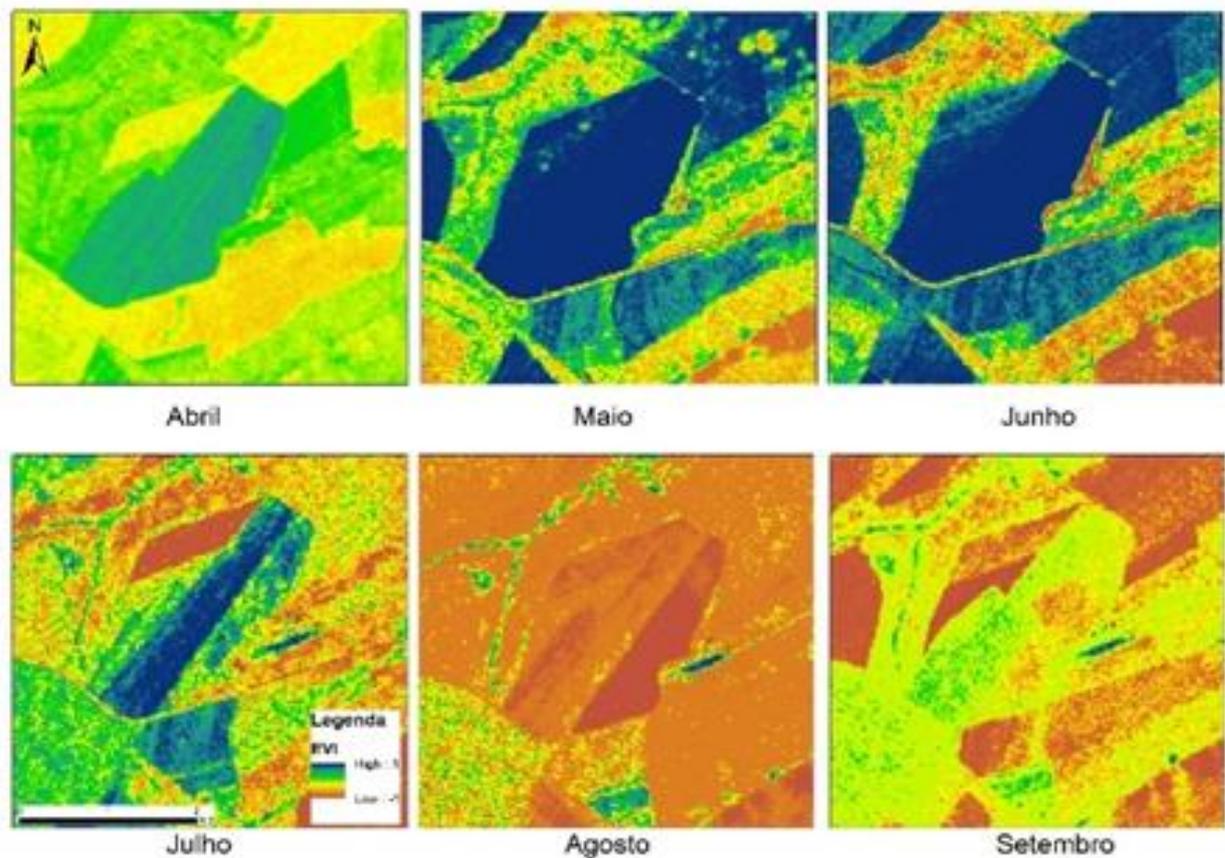


Figura 5 – Mapas dos produtos obtidos pelo Índices de Vegetação EVI, distribuídos mensalmente a partir das imagens Landsat 5.

O SAVI propõe minimizar os efeitos de solo sobre a vegetação utilizando parâmetros de ajustes para atingir este objetivo. É possível observar uma saturação que estabiliza os valores (Figura 6) dos estágios iniciais da cultura (F1, F2 e F3), característica também observada para o NDVI, e uma percepção na detecção de baixos valores para matéria vegetal da cultura do algodoeiro nos estágios que antecedem a colheita (F4). Contudo a tentativa de suavizar o efeito do solo foi bastante expressiva como é possível observar nos mapas (Figura 7-e), a abrupta estimativa da vegetação da cultura nos estágios de crescimento vegetativo, reprodução e maturação (F1, F2 e F3).

De acordo com o proposto por Huete (2002) e corroborado por Gilabert et al. (2002) e Eastman (2006), o índice ajustado para o solo reduz o efeito do substrato no índice, destacando que a resposta da vegetação foi alcançada.

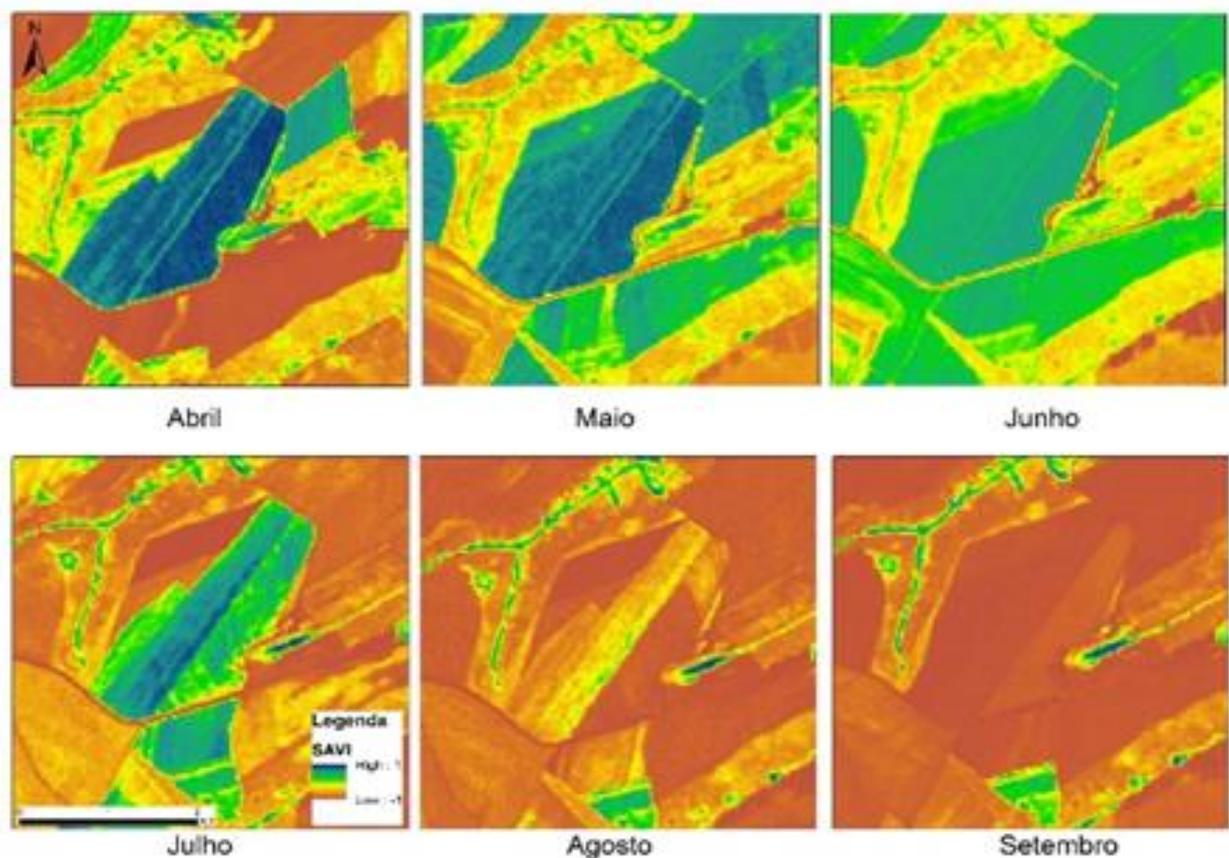


Figura 6 – Mapas dos produtos obtidos pelo Índices de Vegetação SAVI, distribuídos mensalmente a partir das imagens Landsat 5.

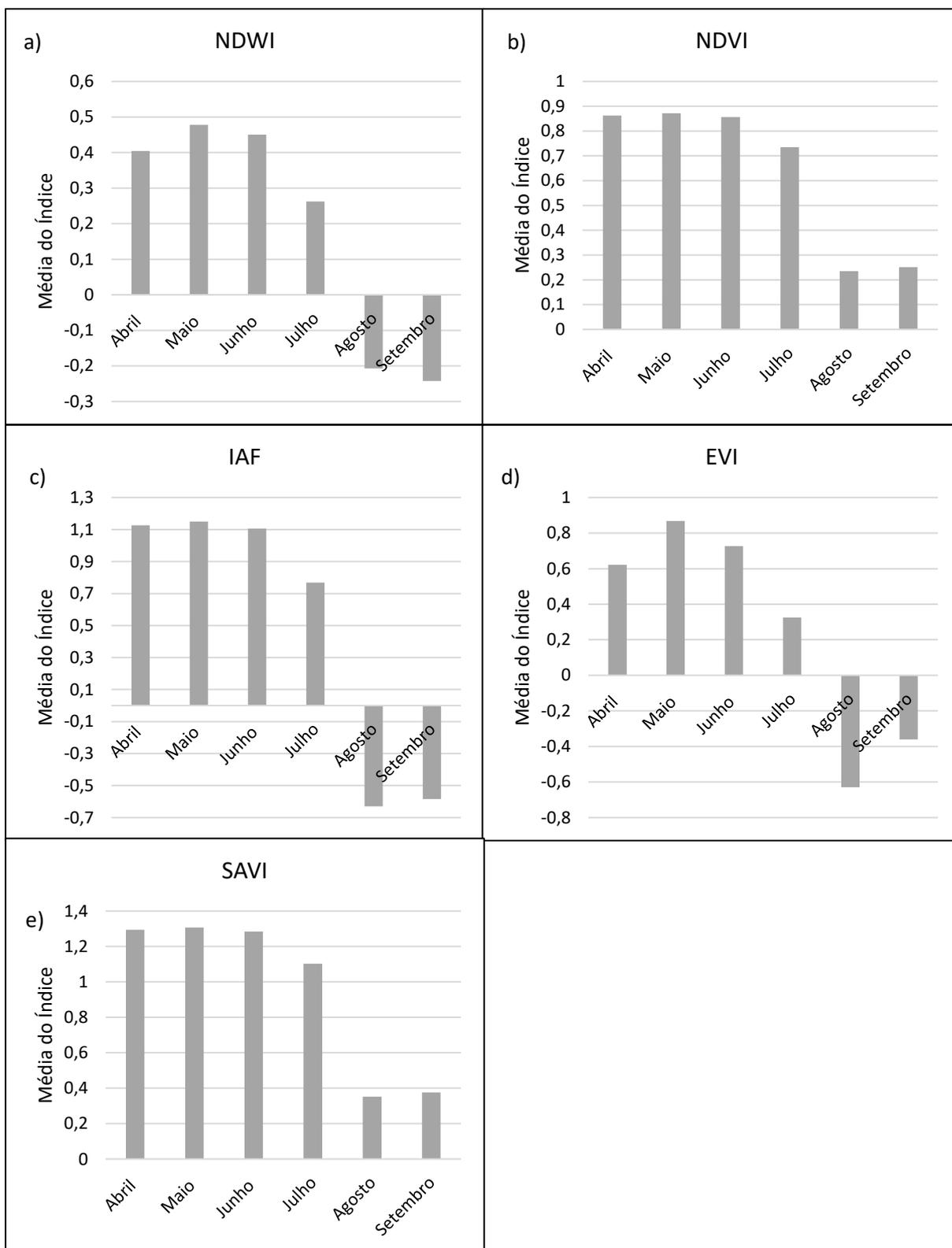


Figura 7 – Representação gráfica das médias temporais mensais obtidos pelos Índices de Vegetação propostos, a - NDWI, b - NDVI, c - IAF, d - EVI e e - SAVI.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os mapas das imagens processadas para os cinco índices propostos permitiram detectar e separar em diferentes estágios fenológicos da cultura do algodoeiro. As informações obtidas da cobertura vegetal em todos os meses da cultura, mostraram as mudanças de vegetação baseado nos resultados dos índices de vegetação.

O EVI enfatizou mais a influência da vegetação em seus valores, levando em consideração o conhecimento prévio da cultura. O NDWI também se mostrou sensível na caracterização da cultura, principalmente nos estágios iniciais do crescimento vegetativo.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Federal de Lavras, UFLA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, PPGEA-UFLA – Departamento de Engenharia, DEG-UFLA – Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Mato Grosso, FAPEMAT – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES.

6. REFERÊNCIAS

ABRAPA – Associação Brasileira dos produtores de algodão. Sistema de Informações de Negócios com Algodão em Pluma, **resumo de vendas realizadas pelo produtor**, 2018.

BORATTO, I. M. P. Espacialização da evapotranspiração na região norte de Minas Gerais. 1. ed. Saarbrücken: **Novas Edições Acadêmicas**, v. 1. 149p, 2014.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. A cultura do algodão: Análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos-safra 2006/07 a 2016/17. **Compêndio de estudo**, V8, 2017.

CONRAD, C.; RAHMANN, M., MACHWITZ, M.; STULINA, G. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan. **Global and Planetary Change**, Volume 110, Part A, p. 88-98, November 2013.

EASTMAN, J.R; IDRISI, A. **Guide to GIS and Image Processing**. Clark Laboratory. Clark university. Worcester/MA. USA. 284p, 2006.

FRITZ, S.; SEE, L., YOU, L.; JUSTICE, C.; BECKER-Reshef, I.; BYDEKERKE, L.; CUMANI, R.; DEFOURNY, P.; ERB, K.; HANSEN, M.; HERTEL, T. The need for improved maps of global cropland. **Eos Trans**, v.3, p. 31–32, AGU 2013.

GILBERT, M.A; GONZÁLEZ-PIQUERAS; J; GARCÍA-HARO, F.J; MELIA, J. A generalized soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 82. p. 303–310, 2002.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices." **Remote Sensing of Environment**, v.8, p. 195-213, 2002.

KUEMMERLE, T., ERB, K., MEYFROIDT, P., MÜLLER, D., VERBURG, P.H., ESTEL, S., HABERL, H., HOSTERT, P., Jepsen, M.R., KASTNER, T., LEVERS, C., LINDNER, M., PLUTZAR, C., VERKERK. Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. **Curr. Opin. Environ. Sustain**, v.5, n.1, p. 1–10, 2013.

LOEBMANN, D. D. S.; MAÇORANO, R.; da SILVA, G. B. S.; VICENTE, L.; VICTORIA, D. D. C. Interpretação de alvos a partir de imagens de satélite de média resolução espacial. Embrapa Monitoramento por Satélite-Circular Técnica, **INFOTECA-E**, (ISSN 1414-4182), 2012.

MARUR, C. J.; RUANO O. Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Recomendações para cultura do algodoeiro no Paraná**. Londrina. p.2-7. (Circular, 107), 2010.

MASSEY, R.; SANKEY, T. T.; CONGALTON, R. G.; YADAV, K.; THENKABAIL, P. S.; OZDOGAN, M.; SÁNCHEZ-MEADOR; A. J. MODIS phenology-derived, multi-year distribution of conterminous U.S. crop types. **Remote Sensing of Environment**, v.198, p.490–503, 2017.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of cotton plant. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. dos. (Ed.). Cultura do algodoeiro. Piracicaba: **POTAFOS**, p. 35-55, 1999.

PONZONI, F. J.; SHUMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Ed. A Silva Vieira, 127p, 2010.

ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **POTAFOS: Informações Agronômicas** N° 95, 9p, 2010.

SILVA, I. P. F.; JUNIOR, J. F. S.; ARALDI, R.; TANAKA, A. A.; GIROTTO, M.; BOSQUÊ, G. G.; LIMA, F. C.C. ESTUDO DAS FASES FENOLÓGICAS DO ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 10, n. 20, p. 1 – 10, 2011.

VALLEJOS, M.; VOLANTE, J. N.; MOSCIARO, M. J.; VALE, L. M.; BUSTAMANTE, M. L.; PARUELO, J. M. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geo-database from 1976 to 2012. **J. Arid Environ**, v. 123, p. 3–11, 2015.

ARTIGO 2

RADIOMETRIC CHARACTERIZATION AND VARIABILITY SPACE-TEMPORAL OF COTTON PLANT IN AGROECOSSYSTEM OF MATO GROSSO.

Jefferson Francisco Soares¹, Marcelo de Carvalho Alves¹

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras
Caixa postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brazil.

Artigo preparado de acordo com as normas do periódico “*Journal of Hyperspectral
Remote Sensing*”

Versão Final

Received 6 July 2019; accepted 17 December 2019

Vol.9, n°4, 2019.

RADIOMETRIC CHARACTERIZATION AND VARIABILITY SPACE-TEMPORAL OF COTTON PLANT IN AGROECOSSYSTEM OF MATO GROSSO.

Abstract

The cotton crop has important phenological variations that influence the spectral behavior and can help in the dynamic management process. The objective of this work was to evaluate the applications of the multispectral bands of the Landsat-5TM sensor, and the specttemporal characterization of the phenology of the cotton crop on the cultivar 966 Bayer Fiber Max®. Vegetation index (IV) were calculated to aid in the discrimination of cotton phenology. The temporal monitoring revealed that the best IV for temporal characterization was EVI (0,939-May / 09-0,704 August / 09), which presented results consistent with the phenological phases of the culture. The Tasseled Cap (Wetness, Greenness and Brightness) transformations were associated to physical parameters of the study area and correlated statistically with the data of the proposed IV, NDWI, NDVI and SAVI indexes with higher values of Wetness components ($r = 0.869$, $p < 0.05$), Greenness ($r = 0.878$, $p < 0.05$), Brightness ($r = 0.761$, $p < 0.05$), respectively. By thermal band (B6), the surface temperature was estimated, validated by data from virtual laboratories and by INMET meteorological station. Thus, it was possible to identify and correlate the changes in the spectral reflectance of the cotton in space and time, making possible to interpret the vegetative stages of the culture remotely.

Keywords: remote sensing, vegetation index, Transformation Tasseled Cap.

CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA E VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DO ALGODOEIRO EM AGROECOSSISTEMA DE MATO GROSSO

Resumo

A cultura do algodoeiro possui variações fenológicas importantes que influenciam no comportamento espectral e que podem auxiliar no dinâmico processo de manejo. O objetivo deste trabalho foi avaliar as aplicações das bandas multiespectrais do sensor Landsat-5TM, e a caracterização espectral-temporal da fenologia da cultura do algodoeiro sobre o cultivar 966 Bayer Fiber Max®. Foram calculados os índices de vegetação (IV) para auxiliar na discriminação da fenologia do algodoeiro. O monitoramento temporal revelou que o melhor IV para caracterização temporal foi EVI (0,939-maio/09-0,704 agosto/09) que apresentou resultados condizentes com as fases fenológicas da cultura. As transformações *Tasseled Cap* (*Wetness*, *Greenness* e *Brightness*) foram associados a parâmetros físicos da área de estudo e correlacionadas estatisticamente com os dados dos IV propostos, os índices NDWI, NDVI e SAVI com maiores valores de correlações com os componentes *Wetness* ($r=0,869;p<0,05$), *Greenness* ($r=0,878;p<0,05$), *Brightness* ($r=0,761;p<0,05$), respectivamente. Pela banda termal (B6) foi estimada a temperatura de superfície, validada por dados de laboratórios virtuais e pela estação meteorológica do INMET. Assim, foi possível identificar e relacionar as alterações na reflectância espectral do algodoeiro no espaço e no tempo, possibilitando interpretar os estágios vegetativos da cultura remotamente.

Palavras-chaves: sensoriamento remoto, índice de vegetação, Transformação *Tasseled Cap*.

1. Introdução

O algodão está entre as mais importantes culturas de fibras do mundo, sendo produzido por mais de 60 países, nos cinco continentes (ABRAPA, 2018). O sensoriamento remoto permite realizar uma análise da vegetação de forma processual, possibilitando identificar eventos específicos no tempo e no espaço. Existem diversas técnicas para monitorizar a vegetação e detectar alterações. Contudo, na prática, a seleção do método mais adequado não é fácil, sendo o objetivo da análise e a área de estudo fatores decisivos na sua escolha.

Ao analisar algumas culturas dentre elas o algodão, utilizando imagens do Landsat 7 ETM+ e a transformação *Tasseled Cap* conseguiram obter mapas com uma precisão global de 81%, e utilizando índices de vegetação obtiveram variáveis importantes para separação das diferentes culturas analisadas (Tatsumi et al., 2015). Técnicas que levem em consideração valores dos diferentes índices de vegetação são extremamente apropriadas levando em consideração as diferenças que cada cultura possui em sua fenologia.

Uma aplicação atual que está sendo empregada e a utilização de dados em série temporal é a detecção de diferentes tipos de culturas e suas respectivas fenologias, como foi realizado por Massey et al. (2017), ao utilizarem dados de um sensor de baixa resolução espacial na elaboração de series temporais para diferentes culturas a partir do zoneamento agrícola determinado pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Utilizando produtos de índices de vegetação gerados com imagem do sensor MODIS, foi possível identificar diferentes culturas pelos limiares máximos e mínimos de respostas ao índice de vegetação NDVI, dentre elas a cultura do algodão. Dessa maneira foi realizado o mapeamento automatizado e rotineiro de culturas sem uma coleta repetida e dispendiosa de amostras de campo ano após ano.

Durante a maior parte do ciclo da planta de algodão há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação de frutos. Cada um destes eventos é importante para a produção final, mas é necessário que eles ocorram de modo balanceado (Oosterhuis, 1999).

O ciclo fenológico do algodoeiro pode ser dividido em fases de crescimento e alguns processos característicos da cultura definem cada uma destas fases (Rosolem 2010). A primeira fase é descrita como estágio vegetativo (F1), ocorre entre a emergência da plântula até a formação da primeira folha verdadeira (>2,5cm), seguido pela segunda fase, que é o estágio de formação de botões florais (F2), que se mantém até a abertura da primeira flor considerada

terceira fase (F3), e assim sucessivamente até a abertura do primeiro capulho (F4), tratado como a quarta fase. Alguns autores ressaltam que com a padronização da cultura do algodoeiro dessa forma, torna-se fácil comparar os dados com diferentes outros trabalhos de pesquisas realizados em diversas localidades (Rosolem, 2010; Marur e Ruano, 2010).

Dentre os problemas que a cultura do algodoeiro apresenta, um dos principais é a exigência da temperatura e umidade ideal nas diferentes fases vegetativas de seu ciclo fenológico. Diversas pesquisas têm feito uso da imagem termal, destacando o estudo realizado por Rao (1972), que foi o primeiro a demonstrar que as determinadas áreas poderiam ser identificadas por meio de análises de dados na faixa do infravermelho termal adquiridos por um satélite. Pesquisadores (Fialho, 2012; Sousa e Ferreira Júnior, 2012; Nascimento, 2011; Weng, 2010; Liu, 2006) também usaram os sistemas de sensoriamento remoto infravermelhos termais para extrair informação de temperatura da superfície.

No entanto, conjuntos de dados especialmente mapas de cobertura de terra agrícola, ainda apresentam falhas de precisão e detalhes (Fritz et al., 2013). Informações que descrevem a agricultura além da área, como intensificação agrícola estão especialmente ausentes (Kuemmerle et al., 2013). Os mapas de cobertura terrestre que descrevem a área agrícola não são suficientes para melhorar a nossa compreensão da rápida mudança de produtos agrícolas (Vallejos et al., 2015).

De modo geral, a cultura do algodoeiro possui variações fenológicas que podem ser monitoradas por radiômetro orbital de alta resolução temporal e espacial e é possível caracterizar a magnitude e a estrutura da dependência espacial do algodoeiro utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Desta forma o objetivo desta pesquisa foi utilizar dados do satélite Landsat-5 TM para caracterização radiométrica e variabilidade espaço temporal do algodoeiro em um agrossistema variável, propondo métodos replicáveis, acessíveis e de baixo custo.

2. Material e métodos

A área de estudo está localizada no estado do Mato Grosso, no município Chapada dos Guimarães, em uma cultura de algodoeiro na fazenda Ouro Branco, que contempla uma área amostral de 8.000 m², com centroide localizado nas coordenadas UTM 21L 663.385m 8.284.868 m (Figura 1).

Levando em consideração à cultura do algodoeiro, a região da Chapada dos Guimarães possui condições edafoclimáticas totalmente favoráveis. O clima da região de acordo com a

classificação Köppen-Geiger é tropical úmido com invernos secos (Tipo Aw), que no geral se distingue por duas estações: uma seca e outra chuvosa, com precipitação máxima de 1.500 mm anuais, ideal para a rotação de culturas como a soja e algodão que exigem uma precipitação que varie de 500 a 1600 mm. O algodoeiro especificamente requer calor e umidade no solo para completar seu ciclo vegetativo, devendo o final do ciclo coincidir com o período seco (EMBRAPA, 2018).

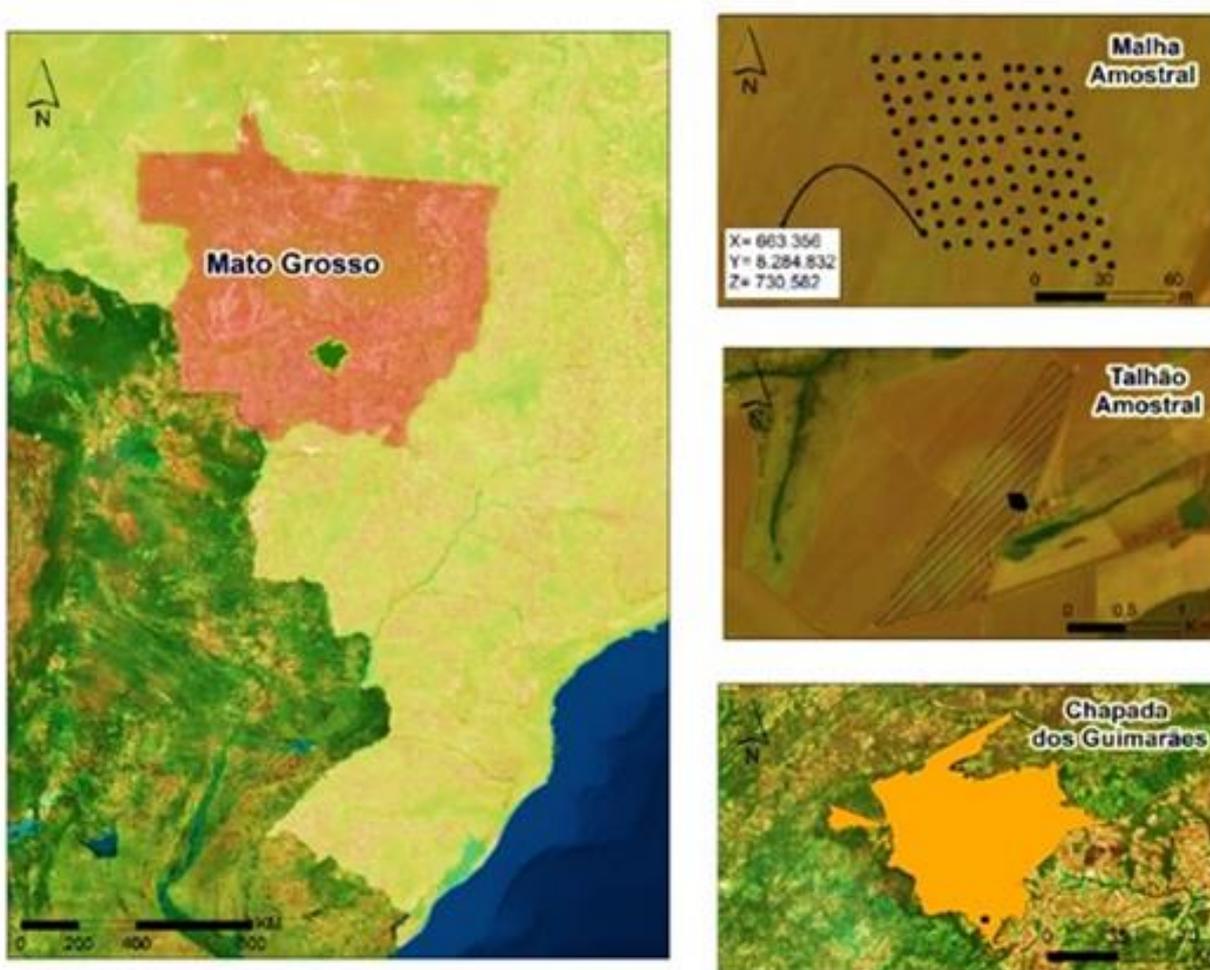


Figura 1- Definição do arranjo espacial da malha amostral composta por 100 pontos georreferenciados, delimitação do talhão onde se encontra e a delimitação do município Chapada dos Guimarães.

A região se caracteriza por apresentar temperaturas com médias anuais máximas variando de 35 a 38 °C, enquanto as anuais mínimas variam de 19 a 21 °C. De acordo com Silva et al. (2011), a faixa de temperatura para a germinação do algodoeiro está entre 25 e 30 °C. Na fase de crescimento vegetativo, a faixa ideal está entre 27 e 32 °C. Assim, o ponto ótimo de temperatura para o desenvolvimento do algodão está entre 20 e 35 °C, isto porque, nessa

faixa o processo de germinação é acelerado resultando em uma emergência mais rápida da planta.

O relevo que é em sua maior parte plano ou levemente ondulado favorece a movimentação de máquinas agrícolas no plantio e na colheita. O solo foi classificado como latossolo de textura muito argilosa e a luminosidade atinge no verão aproximadamente 13 horas de luz com o nascer do sol às 5:25 e o pôr do sol às 18:30 (EMBRAPA, 2018).

No Mato Grosso o plantio da cultura do algodoeiro vai de novembro até fevereiro e a colheita acontece em junho se estendendo até agosto. O algodoeiro possui uma legislação para o vazio sanitário, que é um período em que o produtor não deve ter em sua lavoura plantas vivas da cultura, esta medida visa proteger a produção do estado de prejuízos ocasionados por diferentes tipos de praga específicos da cultura do algodoeiro (EMBRAPA, 2018).

A área amostral para locação dos pontos compreendeu uma malha irregular de 100 pontos georreferenciados, todos coletados utilizando GPS geodésico Topcon Hiper L1/L2, RTK (Real Time Kinematic ou Posicionamento Cinemático em Tempo-Real) envolvendo uma área de 8.000m² dentro do talhão da cultura.

Foram selecionadas imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, produto collection 1 Level 1. A aquisição das imagens foi realizada pelo site do USGS (United States Geological Survey) disponível em <http://www.earthexplorer.usgs.gov>. As imagens selecionadas datadas entre os meses de abril a setembro de 2009, período do plantio à pós-colheita.

Todas as imagens foram sobrepostas pelos pontos amostrais para garantir que não haja imperfeições na área de estudo. No total foram analisadas 77 cenas da área amostral. A Tabela 1 demonstra uma síntese dos dados coletados.

Os dados radiométricos foram determinados para cada ponto amostral, mediante o cálculo de médias aritméticas entre os valores de reflectância da superfície extraídos de toda a extensão da área amostral, obtidos automaticamente pixel a pixel de todas as bandas espectrais (Banda 1, Banda 2, Banda 3, Banda 4, Banda 5, Banda 6 e Banda 7) que sobrepuserem os pontos da malha amostral levantados com o GPS geodésico em campo. Ao todo foram coletados 700 valores espectrais mensais e 4.200 valores espectrais analisados no período de estudo.

Os valores digitais foram extraídos automaticamente após serem programados em rotina Python, coletando automaticamente os valores das bandas orbitais selecionadas evitando a existência de pontos duvidosos, uma vez que, dados extraídos manualmente podem conter incoerências quanto ao seu posicionamento, pois se tratando de uma malha irregular, alguns pontos podem sobrepor a borda dos pixels.

Tabela 1 - Datas de obtenção das imagens do satélite Landsat-5 TM para a área de estudo, data do processamento, bandas analisadas e quantificação dos pontos avaliados.

Mês	Data da Cena	Data do Processamento	Bandas Avaliadas	Pontos Amostrais	Dados Coletados	Resumo
Janeiro	10/01/2009	16/05/2017	7	0	0	Nuvem
Fevereiro	11/02/2009	18/09/2017	7	0	0	Nuvem
Março	31/03/2009	18/09/2017	7	0	0	Nuvem
Abril	16/04/2009	16/05/2017	7	100	700	Sem nuvem
Maiο	18/05/2009	16/05/2017	7	100	700	Sem nuvem
Junho	03/06/2009	16/05/2017	7	100	700	Sem nuvem
Julho	21/07/2009	16/05/2017	7	100	700	Sem nuvem
Agosto	06/08/2009	16/05/2017	7	100	700	Sem nuvem
Setembro	07/09/2009	24/08/2017	7	100	700	Sem nuvem
Total			63	600	4200	

A transformação *Tasseled Cap* (TC) é uma ferramenta útil para compactar dados espectrais em algumas bandas associando-as a características físicas das imagens (Crist e Cicone, 1984). Originalmente construído para compreender fenômenos importantes do desenvolvimento de culturas no espaço espectral (Kauth e Thomas, 1976), a transformação tem aplicações potenciais na elevação de atributos-chave da vegetação, incluindo espécies, idade e estrutura (Cohen et al., 1995).

As transformações espectrais têm sido frequentemente empregadas em imagens obtidas por sensores orbitais, tanto para reduzir a dimensão dos dados armazenados, como para realçar espectralmente as feições de interesse representadas na imagem (Richards e Jia, 2000). Os coeficientes utilizados na transformação foram baseados nos precursores da transformação do TC na literatura com a utilização de dados do satélite Landsat-5 TM, como mencionado em Crist e Cicone (1984), na Tabela 2 temos os valores para os coeficientes desta literatura.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes para os componentes *brightness*, *greennes* e *wetness* da transformação do *Tasseled Cap* de acordo com a literatura proposta.

<i>Tasseled Cap</i>	Bandas					
	B1	B2	B3	B4	B5	B7
<i>Brightness</i>	0,3037	0,2793	0,4743	0,5585	0,5082	0,1863
<i>Greennes</i>	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7243	0,0840	-0,1800
<i>Wetness</i>	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,7112	-0,4572

Fonte: Adaptada de Crist e Cicone (1984).

A transformação TC é proposta em três componentes, o primeiro chamado de *brightness*, está relacionado à variação espectral dos solos e é a soma ponderada de todas as

bandas; o segundo denominado *greenes*, relacionado ao vigor da vegetação e é a diferença entre o canal do infravermelho próximo e os canais do espectro visível e infravermelho médio; e o terceiro denominado de *wetness* que é o contraste entre o infravermelho médio e os demais canais. As equações dos três componentes foram descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações utilizadas na obtenção dos componentes *brightness*, *greenes* e *wetness* da transformação *Tasseled Cap* e a ordem das bandas espectrais de acordo com a literatura proposta.

Componente do <i>Tasseled Cap</i>	Respectivos coeficientes e bandas espectrais da equação
<i>Brightness</i>	$0,3037*B1+0,2793*B2+0,4743*B3+0,5585*B4+0,5082*B5+0,1863*B7$
<i>Greenes</i>	$-0,2848*B1-0,2435*B2-0,5436*B3+0,7243*B4+0,0840*B5-0,1800*B7$
<i>Wetness</i>	$0,1509*B1+0,1973*B2+0,3279*B3+0,3406*B4-0,7112*B5-0,4572*B7$

Para a transformação as análises foram realizadas separadamente para cada componente, considerando as bandas que compreendem o intervalo de 0,45 a 2,35 μm . Os principais componentes foram gerados individualmente para cada mês, criando um mosaico para a representação da área de estudo. Os autovalores das componentes principais foram reescalados para valores entre 0 e 255, de modo que todas as imagens tivessem a mesma escala.

No total foram analisados 18 produtos, resultantes da transformação do TC da área amostral. A Tabela 4 apresenta uma síntese dos dados que foram processados. Os valores digitais foram extraídos automaticamente pixel a pixel dos componentes gerados pela transformação, ao todo foram coletados 300 valores mensais e 1.800 valores totais para análise dos componentes da transformação TC no período de estudo.

Tabela 4 - Data de obtenção das imagens do satélite Landsat-5 TM da área de estudo, data da transformação do *Tasseled Cap* e quantificação dos valores analisados dos componentes.

Mês	Data da Cena	Data do Processamento	Componentes do TC	Pontos Amostrais	Dados Coletados
Abril	16/04/2009	14/05/2018	3	100	300
Mai	18/05/2009	16/05/2018	3	100	300
Junho	03/06/2009	16/05/2018	3	100	300
Julho	21/07/2009	16/05/2018	3	100	300
Agosto	06/08/2009	16/05/2018	3	100	300
Setembro	07/09/2009	16/05/2018	3	100	300
Total			18	500	1.800

Os dados estimados de precipitação foram obtidos do laboratório virtual do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), SeriesView, que disponibiliza dados temporais de precipitação acumulada mensalmente, provenientes do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), detalhando informações a respeito da intensidade, distribuição, altura pluviométrica e diferentes tipos de chuva. Foram coletados também, dados meteorológicos históricos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na região (Estação N°- 83361), que dista 35 km da área de estudo (INMET, 2018).

Já os dados estimados de temperatura foram obtidos a partir de produtos do satélite TRMM e do satélite TERRA, ambos coletados do laboratório virtual do INPE, foram coletados também dados históricos de temperatura da estação meteorológica do INMET. Os dados de temperatura foram comparados com a média mensal dos dados de calculados de temperatura de superfície (Ts) utilizando os valores obtidos da banda termal (B6) do satélite Landsat-5 TM. Para obtenção dos dados referentes a Ts a partir da banda 6 da imagem do sensor é necessário converter os números digitais para valores de temperatura de brilho da superfície. A Equação 1, foi proposta por Qin e Karnieli (2001) e utilizada para o estudo na geração dos valores do espectro de radiação.

$$L\lambda = \left(\frac{L_{Max(\lambda)} - L_{Min(\lambda)}}{Q_{CalMax} - Q_{Calmin}} \right) \times (Q_{CalMax} - Q_{Calmin}) + L_{Min} \quad (1)$$

Em que:

$L(\lambda)$ é a radiação de energia espectral;

$L_{Max}(\lambda)$ e a radiância máxima espectral digital (15.303);

$L_{Min}(\lambda)$ é a radiância mínima espectral digital (1.238);

Q_{CalMax} é -255;

Q_{CalMin} é 1.

Após obtenção dos valores do espectro de radiação, foi utilizado o valor de L para calcular a Ts, assim, foi utilizado da Equação 2, proposta por Qin et al. (2001) para conversão de radiação para a estimativa de valores de temperatura de brilho da superfície.

$$T_b = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L\lambda} \right) + 1} \quad (2)$$

Em que:

$L(\lambda)$ é a Radiação de energia espectral;

K_1 é a constante de calibração (607,76);

K_2 é a constante de calibração (1260,56);

T_b é a temperatura da superfície em Kelvin.

Devido ao método proposto, os valores de T_s resultaram em valores na escala Kelvin, sendo subtraído dos valores obtidos o valor de 273,15 para que os valores finais de cada ponto amostral tabelado ficassem em graus Celsius ($T_s = T_b - 273,15$), assim na mesma escala dos dados obtidos pela estação meteorológica e pelos dados dos sensores, para que se pudesse analisar suas relações.

Os índices de vegetação (IV) foram propostos de acordo com as literaturas pesquisadas para que fosse possível analisar as características da área de estudo em diferentes abordagens, como análises da condição da vegetação, interferência do solo, presença de água na vegetação e análise de indicador de biomassa.

Todos os IV foram calculados automaticamente e também programados em rotina Python. Os valores para área de estudo foram extraídos pela sobreposição da malha amostral de 100 pontos georreferenciados. Os IV estudados foram o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Índice de Área Foliar* (IAF) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), e os cálculos para obtenção dos valores dos IV estão descritos na Tabela 5.

No total foram analisados 30 produtos, resultantes dos IV calculados da área amostral. A Tabela 6 demonstra uma síntese dos dados que foram processados. Ao todo foram coletados 500 valores mensais e 3.000 valores totais para análise dos IV no período de estudo.

Tabela 5 - Índice de vegetação propostos, suas respectivas equações e descrição das bandas espectrais utilizadas para cada índice de vegetação.

Índice de Vegetação	Equação para Obtenção do Índice de Vegetação	Descrição das Bandas Espectrais e Respetivos Coeficientes
NDVI	$= \frac{IVP - V}{IVP + V}$	IVP: Reflectância na banda do infravermelho próximo; V: Reflectância na banda do vermelho.
NDWI	$= \frac{IVP - IVM}{IVP + IVM}$	IVM: Reflectância na banda do infravermelho médio (B5).
SAVI	$= \frac{(1 + L_s) \times (IVP - V)}{(L_s + IVP + V)}$	L _s : Fator de ajuste do índice SAVI; V: Reflectância na banda do vermelho.
IAF	$= \frac{\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$	SAVI: valor do IV SAVI
EVI	$= G \times \frac{IVP - V}{IVP + C_1 \times V - C_2 \times A + L}$	A: Reflectância na banda do azul C ₁ : Coeficiente de correção da banda do vermelho (=6) C ₂ : Coeficiente de correção da banda do azul (=7,5) L: Fator de correção para a interferência do Solo (=1) G: Fator de Ganho (=2,5)

Fonte: Boratto (2014).

Tabela 6 - Data de obtenção das imagens do satélite Landsat-5 TM da área de estudo, data do processamento dos índices de vegetação e quantificação dos pontos avaliados.

Mês	Data da Cena	Data do Processamento	I.V.	Pontos Amostrais	Dados Coletados
Abril	16/04/2009	15/11/2017	5	100	500
Mai	18/05/2009	16/11/2017	5	100	500
Junho	03/06/2009	16/11/2017	5	100	500
Julho	21/07/2009	16/11/2017	5	100	500
Agosto	06/08/2009	16/11/2017	5	100	500
Setembro	07/09/2009	16/11/2017	5	100	500
Total			30	500	3.000

As relações entre os dados radiométricos e os valores obtidos das transformações foram avaliadas por meio de quatro estratégias distintas. A primeira, por meio da análise visual dos mapas dispostos temporalmente em diferentes composições de cores, uma vez que, a combinação das bandas contém informações espectrais realmente desejadas para um melhor entendimento do desenvolvimento da cultura. Na segunda, foram analisados os produtos dos IV temporal e seus respectivos mapas, sua representação gráfica com o objetivo de estabelecer prováveis relações com os demais dados amostrados e com a cultura. Na terceira, foram analisados os produtos das transformações do *Tasseled Cap*, e sua correlação com os IV, dados do laboratório virtual e dados meteorológicos do INMET.

A quarta estratégia foi a validação estatística dos dados obtidos, o teste proposto calculou os coeficientes de correlação de Pearson (r), que varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis.

Por ser tratar de uma medida padronizada a interpretação da magnitude dos coeficientes é uma importante etapa do estudo, para Cohen et al. (1995), valores de coeficiente entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos, valores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios, e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancey e Reidy (2006) apontam para uma classificação diferente, onde valores de coeficiente entre 0,10 e 0,30 são considerados fraco, valores de 0,40 até 0,6 considerados moderados e valores entre 0,70 e 1 fortes. Dessa forma, tomamos como certo que quanto mais perto de 1 independente do sinal, maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis.

Para este estudo, foi adotado a escala de padronização do coeficiente de Pearson de acordo com o proposto por Shimakura (2006) para a análise das magnitudes das correlações, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de determinação sobre a classificação dos valores de correlação de Pearson (r) e suas respectivas interpretações.

	Valores de r (+ ou-)		Interpretação
Coeficientes de Pearson	0	0,19	Uma correlação muito fraca
	0,2	0,39	Uma correlação fraca
	0,4	0,69	Uma correlação moderada
	0,7	0,89	Uma correlação forte
	0,9	1	Uma correlação muito forte

Fonte: Adaptado de Shimakura (2006).

3. Resultados e discussão

Foram feitos os cálculos dos IV propostos para o acompanhamento da cultura do algodoeiro. Na Tabela 8, são apresentados os resultados da análise estatística descritiva dos IV NDWI, NDVI, IAF, EVI e SAVI nos meses que sucederam o estudo e a Figura 2 demonstra a configuração temporal média dos valores obtidos.

Os índices foram escolhidos de acordo com suas características, o NDWI mostra-se sensível ao aumento de biomassa, quanto maior incidência de vegetação na cultura, maior é a reflectância no infravermelho próximo, refletindo no aumento do índice. O NDVI obteve dentre os índices propostos a menor influência sobre a mudança da vegetação, sendo observado uma rápida saturação, que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal nos estágios iniciais

do desenvolvimento, ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando valores similares, mesmo com o aumento da densidade do dossel. O IAF é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação, sendo um indicador da biomassa de cada pixel da imagem. O EVI, que propõem otimizar o sinal da vegetação, apresentou uma sensibilidade sobre a densidade de biomassa da cultura do algodoeiro semelhante ao NDWI. O SAVI propõe minimizar os efeitos de solo sobre a vegetação utilizando parâmetros de ajustes.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos índices de vegetação propostos na cultura do algodoeiro.

	Nº de Observações	Mínimo	Máximo	Média	DP	Variância
NDWI	100	-0,21	0,48	0,28	0,28	0,08
EVI	100	-0,63	0,87	0,42	0,62	0,39
NDVI	100	0,23	0,87	0,71	0,27	0,07
IAF	100	-0,63	1,15	0,70	0,76	0,58
SAVI	100	0,35	1,31	1,07	0,41	0,17

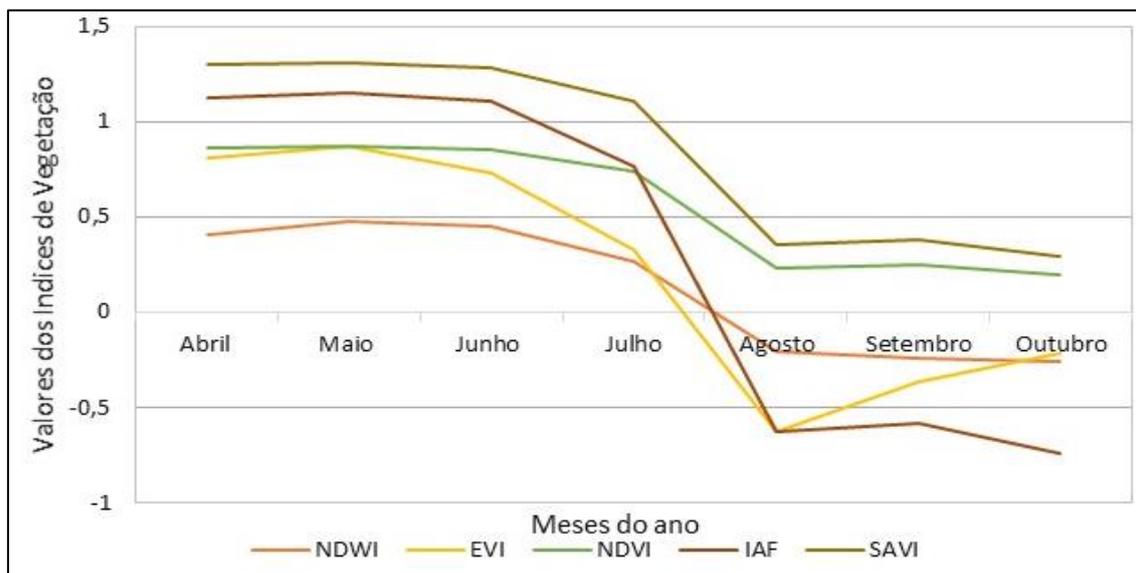


Figura 2 - Curvas espectro-temporais dos Índices de Vegetação propostos obtidos através dos dados do satélite Landsat-5 TM na área amostral da cultura do algodoeiro.

A estratégia de avaliação da transformação dos componentes do TC que permite entender as contribuições banda a banda para a cena de interesse, além de comprimir os dados e extrair um significado físico a partir delas. É possível observar nos mapas com os valores dos coeficientes do componente *brightness* (Figura 3(a)) os pixels claros e escuros estão situados

em pixels extremos para os níveis de cinza, os pixels claros que representam a presença de vegetação, e os pixels mais escuros ausência da vegetação ou a presença do solo, levando em consideração que o enfoque da componente no caso é apenas o solo. Essa representação pode ser interpretada através dos valores dos coeficientes aumentarem na faixa azul (B1) e vermelho (B2) e diminuírem nas faixas do infravermelho (B4, B5 e B7).

No componente *greenness* os pixels mais escuros e intensos demonstram a vegetação, quanto aos pixels claros, é notável sua ligeira variação. Esses dados corroboram com a componente *greenness* (Figura 3(b)), já que esta contém informações da vegetação, e apresenta pouca influência da condição de qualquer outro fator como o solo por exemplo. Dentre os coeficientes aplicados este apresenta um alto valor em uma parte da faixa do infravermelho (B4) e as demais faixas em valores significativamente mais baixos.

E para a componente *wetness* (Figura 3(c)) os pixels mais escuros e intensos correspondem a direção observada da variação da umidade, quer seja ela no solo descoberto, ou na própria vegetação. A representação pode ser interpretada pelo aumento do coeficiente nas faixas do visível (B1, B2 e B3) e o decréscimo na faixa do infravermelho (B4, B5 e B6). Para uma imagem com predominância de solos, a vegetação traz pouco acréscimo na região do infravermelho próximo, mas traz bastante decréscimo na região do visível, resultante da absorção desses comprimentos de onda por pigmentos fotossintéticos.

Tomando a transformação TC como um produto fornecedor de características físicas da área de estudo para solo, vegetação e umidade, respectivamente em seus componentes *brightness*, *greenness* e *wetness*, uma maneira de avaliá-los seria a correlação dos valores obtidos da transformação TC com o IV. Na Tabela 9 está representado os valores da correlação de Pearson entre os dados extraídos dos componentes do TC para os mesmos pontos extraídos para os IV, para os mesmos seis meses propostos no estudo. Levando em consideração a proposta de cada IV, o índice NDWI que propõem analisar a presença de água foi o que melhor se correlacionou com a componente *wetness* ($r=0,869$; $p<0,05$) que é a componente que caracteriza a variação da umidade. Já o índice NDVI que se relaciona com as áreas de vegetação com maior vigor se correlacionou melhor com a componente *greenness* ($r=0,878$; $p<0,05$) que se caracteriza com as variações da vegetação. E o índice SAVI que propõem considerar em sua análise o efeito do solo, obteve correlação com a componente *brightness* ($r=0,761$; $p<0,05$).

Para solos de baixa refletância o incremento de vegetação apresentará menos a refletância no visível, mas o espalhamento múltiplo resultante dos tecidos vegetais traz um aumento substancial na região do infravermelho próximo. Os coeficientes propostos, são muito

influenciados pela variação de umidade. Devido ao fato de que a componente *greenness* que contém informações da vegetação, possui pouca influência do tipo ou condição de solo.

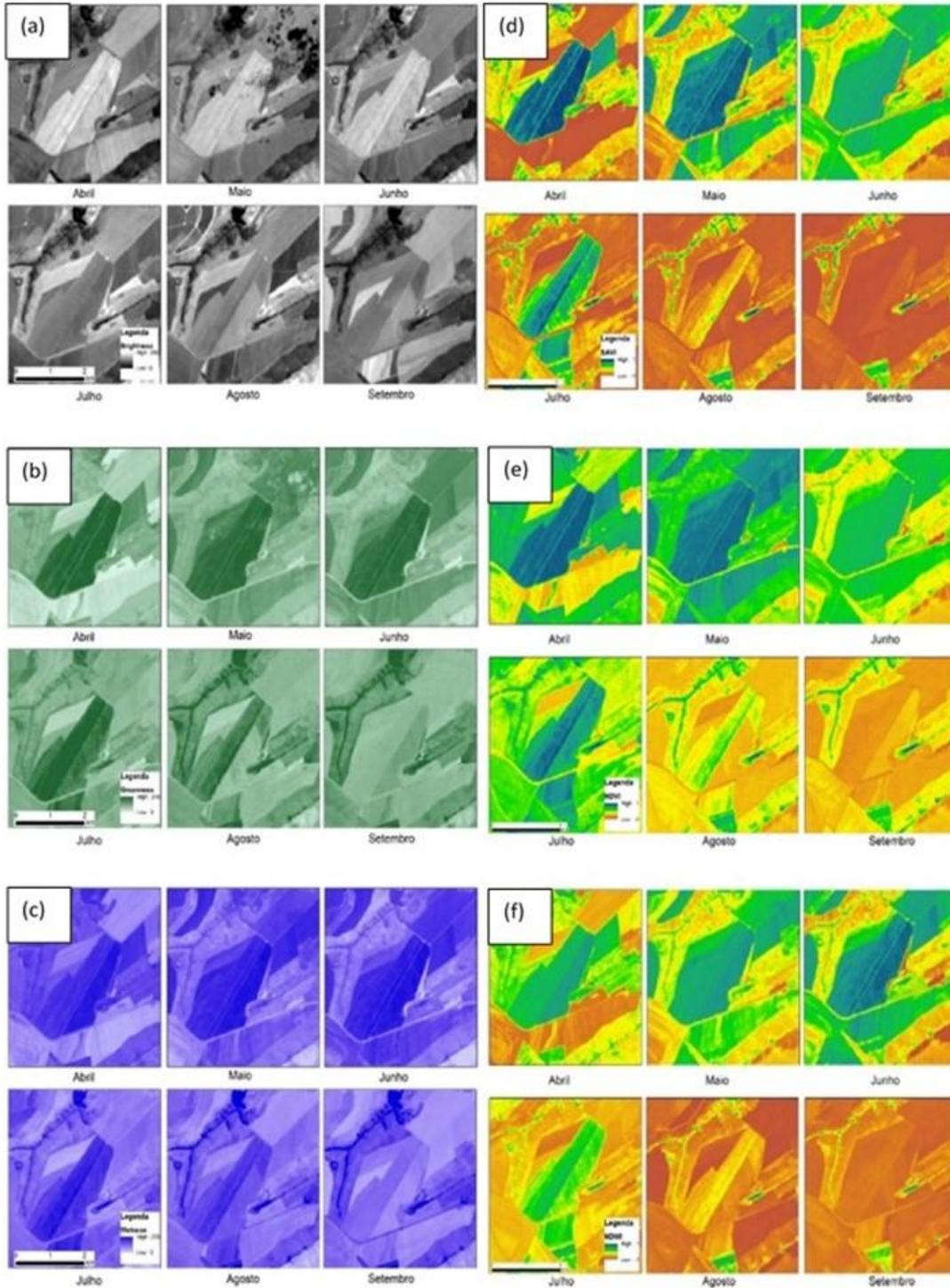


Figura 3 - Mapas do componente *brightness*(a), *greenness*(b) e *wetness*(c) da transformação *Tasseled Cap* e dos índices de vegetação SAVI(d), NDVI(e) e NDWI(f) respectivamente, obtidos mensalmente a partir das imagens Landsat-5 TM.

Tabela 9 - Coeficiente de correlação (r) de Pearson relativos aos valores observados nos componentes do *Tasseled Cap* (TC) e aos Índices de Vegetação propostos (IV).

	NDWI	EVI	NDVI	IAF	SAVI
<i>Wetness</i>	0,869	0,767	0,730	0,630	0,630
<i>Greenness</i>	0,778	0,585	0,878	0,538	0,585
<i>Brightness</i>	0,585	0,638	0,585	0,585	0,761

Para os mesmos valores amostrais tabelados utilizados nas correlações de Pearson da tabela anterior, os componentes TC e os IV, foram processadas por seus valores de média para cada mês do estudo e os valores obtidos foram representados de forma gráfica.

Os valores obtidos no índice NDVI e o comportamento dos valores do componente *greenness* demonstram um comportamento de similaridade na análise da presença de umidade em ambas as técnicas (Figura 4(a)). O mesmo ocorreu para o índice NDWI e o componente *wetness* (Figura 4(b)), acompanhando o padrão da correlação, para estes pares os valores de correlação foram maiores e os gráficos melhor se correlacionaram. Já o índice SAVI e a componente *brightness* (Figura 4(c)) foram as correlações de menor coeficiente, vale salientar que todas as correlações obtidas apresentaram de acordo com a escala proposta por Shimakura (2006) um coeficiente de correlação forte.

Após o processamento da transformação TC, os dados resultantes de cada componente formaram uma composição RGB, representado na Figura 5, onde foi alocado para a faixa *Red* o componente *brightness*, que evidenciou as áreas de presença de solo; a faixa *Green* foi alocado o componente *greenness*, que identificou as áreas de maior incidência de vegetação da cultura; e a faixa *Blue* que alocou o componente *wetness* que discriminou a umidade na vegetação e nos corpos d'água da área de estudo. De modo geral os mapas mostram a presença constante da vegetação nos estágios de desenvolvimento da cultura e evidencia as áreas com pouca vegetação no período que antecede a colheita e após, onde o solo se encontra desnudo.

Com intuito de corroborar as hipóteses de relação entre os dados obtidos e o comportamento da vegetação, foi comparado os valores do componente *wetness*, e sua estreita relação com a umidade, com dados mensais de precipitação de um laboratório virtual de dados do satélite TRMM e da estação meteorológica do INMET (Estação - 83361) localizada na região (Figura 6).

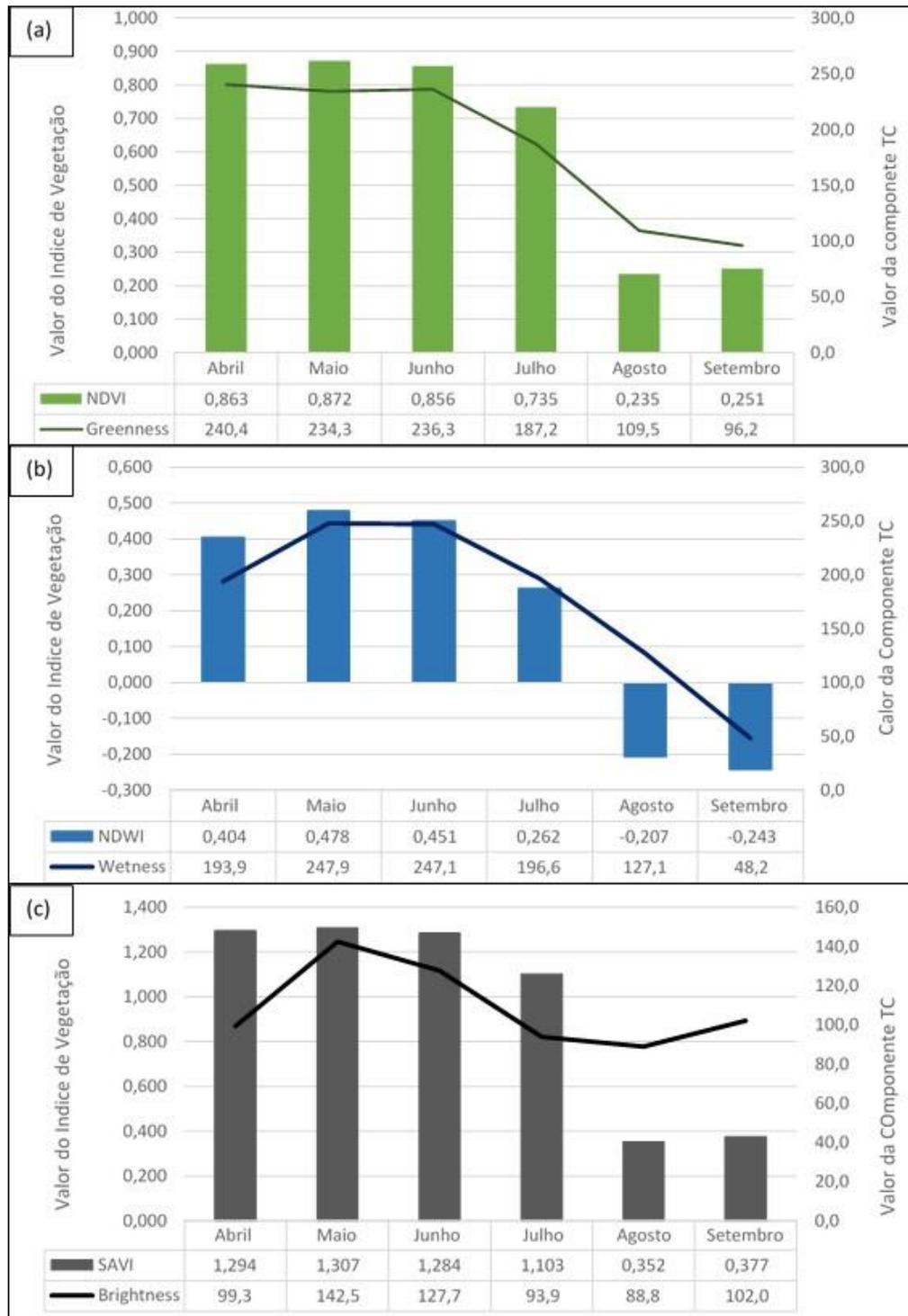


Figura 4 - Gráfico de relação entre as medias mensais dos componentes *greenness* (a), *wetness* (b) e *brightness* (c) da transformação *Tasseled Cap* e dos IV NDVI(a), NDWI(b) e SAVI(c) respectivamente, obtidos mensalmente a partir das imagens Landsat-5 TM.

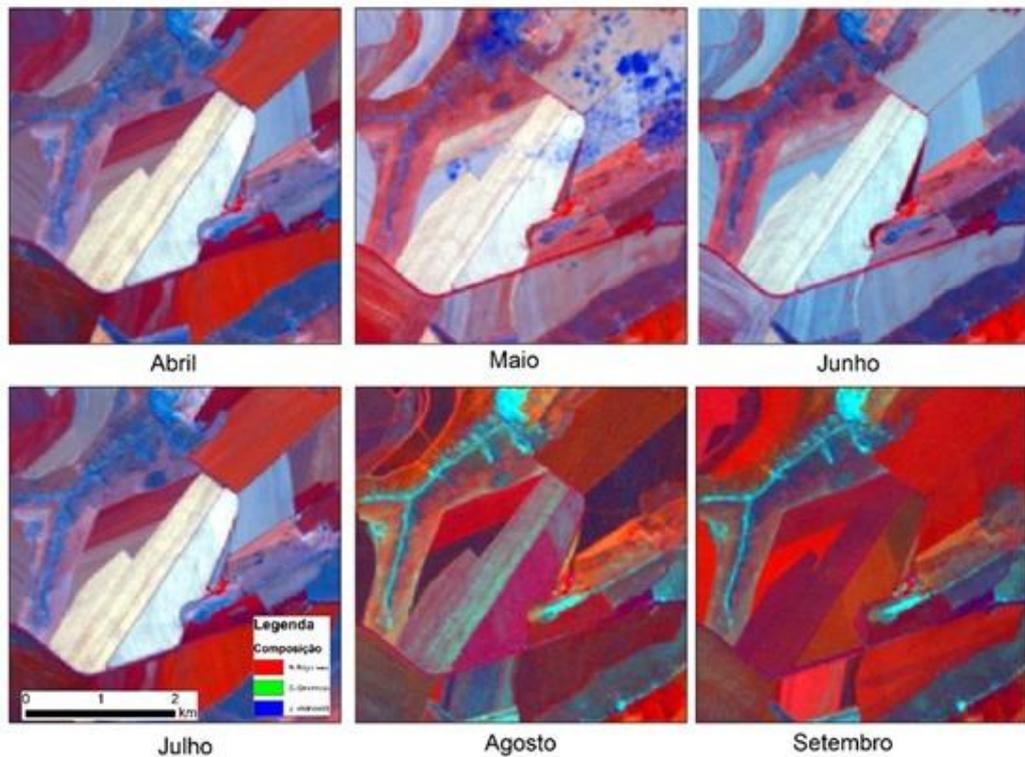


Figura 5 - Mapas da composição RGB para a transformação *Tasseled Cap*, onde *brightness* sendo a faixa *Red*, *greenness* a faixa *Green* e *wetness* a faixa *Blue*, ambos obtidos mensalmente a partir das imagens Landsat-5 TM.

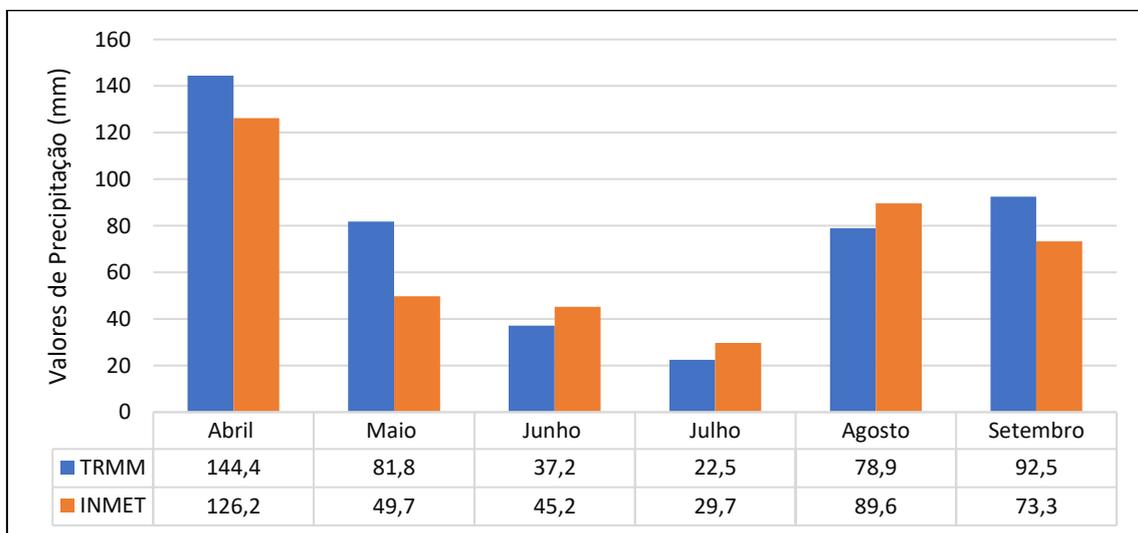


Figura 6 - Medias mensais de precipitação do satélite TRMM e da estação meteorológica do INMET.

Na Tabela 10 foram expressos os valores da correlação de Pearson entre os dados de precipitação do satélite TRMM e da estação meteorológica do INMET, os quais apresentaram uma correlação muito forte ($r=0,913$; $p<0,05$), demonstrando a consistência nos dados obtidos

pelo laboratório virtual, contribuindo para a confiabilidade dos dados processados. Já a correlação entre o componente *wetness* com os dados de precipitação do satélite TRMM ($r=0,532$; $P<0,05$) e com os dados da estação meteorológica do INMET ($r=0,495$; $p<0,05$) foram consideradas moderada de acordo com a classificação de Shimakura (2006).

Tabela 10 - Correlação de Pearson para os valores dos dados do satélite TRMM, dos dados meteorológicos-INMET e dos valores obtidos pelo componente *wetness* do *Tasseled Cap*

	Componente <i>Wetness</i>	Satélite TRMM	INMET
Componente <i>Wetness</i>	1,00	0,532	0,495
Satélite TRMM	0,532	1,00	0,913
INMET	0,495	0,913	1,00

Ao realizar a parametrização da temperatura média registrada entre a estação meteorológica do INMET, os valores médios dos pixels de Ts registrada pelo satélite Landsat-5 TM e pelos laboratórios virtuais (Terra e AQUA), foi observado uma variação térmica recorrente no período de estudo (Figura 7). Weng (2010), salienta que a temperatura média de Ts apresenta, normalmente, valores mais elevados em relação a temperatura média do ar o que, na análise não ocorreu. Na prática essa diferença não interfere nos resultados, uma vez que, a temperatura quantificada pelo satélite é a temperatura radiante da superfície.

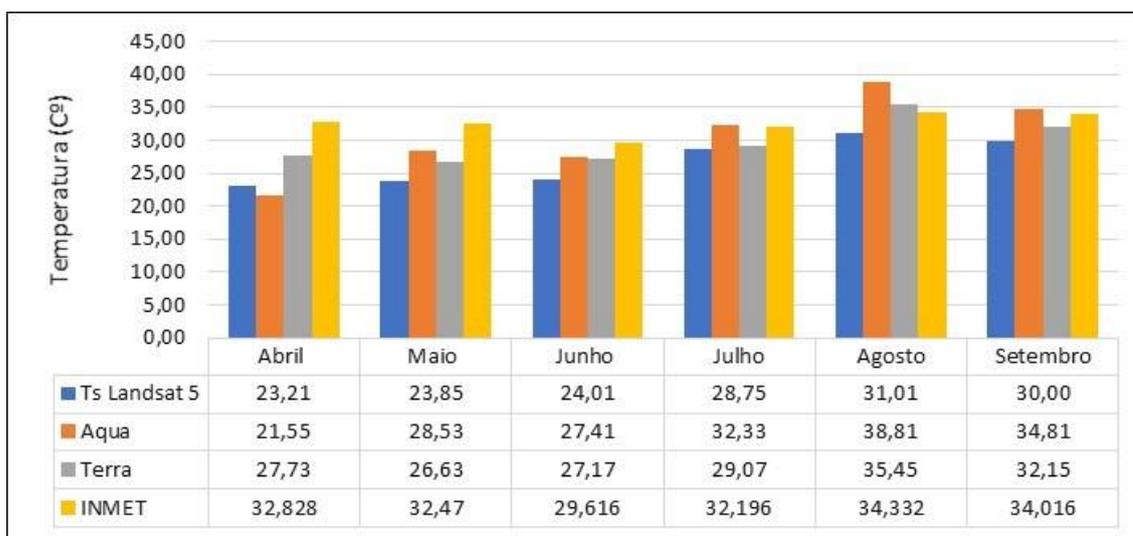


Figura 7 - Gráfico das distribuições dos valores de temperatura mensais calculados (TS Landsat-5 TM) e obtidos de bancos de dados (TRMM, Terra e INMET).

Para a área de estudo, observa-se uma predominância sobre os valores superiores obtidos pela estação meteorológica do INMET. Os valores de Ts calculados pela banda 6 do satélite Landsat-5 TM obtiveram maiores valores ($r = 0,913$ $p < 0,05$) de correlação de Pearson com os dados obtidos pelo sensor Terra, apresentado na Tabela 11, acompanhados pelos dados do satélite AQUA ($r = 0,839$; $p < 0,05$) e pelos valores de correlação com a meteorológica do INMET ($r = 0,805$; $p < 0,05$).

Tabela 11 - Correlação dos dados da estação meteorológica do INMET, Satélite TRMM e dados calculados da Ts satélite Landsat-5 TM.

	Landsat 5	INMET	AQUA	Terra
Ts Landsat-5 TM	1,00	0,805	0,839	0,913
INMET	0,805	1,00	0,533	0,732
Satélite AQUA	0,839	0,533	1,00	0,849
Satélite Terra	0,913	0,732	0,849	1,00

As correlações obtidas pelo Ts Landsat-5 TM tiveram uma relação considerada muito forte com os dados do satélite Terra, e uma correlação forte com os dados do satélite TRMM e da estação meteorológica do INMET de acordo com a classificação de Shimakura (2006). A melhor correlação dos dados da estação meteorológica do INMET foi com os dados calculados de Ts do Landsat-5 TM.

4. Conclusão

A transformação *Tasseled Cap* comprovou uma relação positiva de seus resultados com a características físicas, seus resultados foram interpretados e correlacionados com os índices de vegetação, e suas características tiveram ligação satisfatórias com atributos que cada índice de vegetação propõe. Neste estudo o componente *Wetness* manteve relações singulares com o NDWI, o componente *Greenness* com o NDVI e o componente *Brightness* com o SAVI.

A relação de precipitação pluviométrica do componente *Wetness* comparados com os dados observados do laboratório virtual do INPE e do INMET apresentaram bons resultados, caso especial, principalmente pela importância do fator na cultura do algodoeiro na fase final do manejo. As avaliações de correlação dos dados processados neste estudo mostraram resultados satisfatórios por manter com a estação meteorológica os melhores valores de correlação.

Agradecimentos

Agradecimento a Universidade Federal de Lavras, UFLA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, PPGEA-UFLA – Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Mato Grosso, FAPEMAT – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES.

Referências

ABRAPA, Associação Brasileira dos produtores de algodão, 2018. Sistema de Informações de Negócios com Algodão em Pluma, resumo de vendas realizadas pelo produtor.

EMBRAPA ALGODÃO, Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária, 2018. Biofábrica para produção massal de trichogramma. Uma nova opção ao manejo de pragas do algodoeiro no Mato Grosso. Campina Grande.

Boratto, I.M.P., 2014. Espacialização da evapotranspiração na região norte de Minas Gerais. 1. ed. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 149.

Cohen, W.B.; Spies, T.A.; Fiorella, M., 1995. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*. v.16, n.4, pp.721-746.

Crist, E.P.; Cicone, R.C., 1984. A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM tasseled cap, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-22, n.3, 256-263.

Dancey, C.; Reidy, J., 2006. *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre: Artmed.

Fialho, E.S., 2012. *Estudos Climáticos em Sítios Urbanos e Rurais*, (Orgs.). *Concepções e Ensaio da Climatologia Geográfica e-book*. ED. UFGD, PP-83-112.

Fritz, S., See, L., You, L., Justice, C., Becker-Reshef, I., Bydekerke, L., Cumani, R., Defourny, P., Erb, K., Foley, J., Gilliams, S., Gong, P., Hansen, M., Hertel, T., 2013. The need for improved maps of global cropland. *Eos Trans.* (3), 31–32.

Kauth, R.J.; Thomas, G.S., 1976. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: *Symposium on Machine*

- Processing of Remotely Sensed Data. West Lafayette, jun, 1976. Proceedings. West Lafayette, Indiana, p.41-51.
- Kuemmerle, T., Erb, K., Meyfroidt, P., Müller, D., Verburg, P.H., Estel, S., Haberl, H., Hostert, P., Jepsen, M.R., Kastner, T., Levers, C., Lindner, M., Plutzer, C., 2013. Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5 (1), 1–10.
- Liu, W.T.H., 2006. *Aplicacoes de Sensoriamento Remoto*. Editora Uniderp, Campo Grande – MS.
- Marur, C.J, Ruano O., 2010. Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. *Recomendações para cultura do algodoeiro no Paraná*. Londrina. pp. 2 -7. (Circular, 107).
- Massey, R., Sankey, T.T., Congalton, R.G., Yadav, K., Thenkabail, P.S., Ozdogan, M., Meador, A.J.S., 2017. MODIS phenology-derived, multi-year distribution of conterminous US crop types. *Remote Sensing of Environment*, 198, pp. 490-503.
- Nascimento, D.T.F., 2011. *Emprego de tecnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento na análise multitemporal do fenomeno de ilhas de calor no municipio de Goiania-GO, 2010*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Sociais - Universidade Federal de Goias, Goiania, p. 96.
- Oosterhuis, D.M., 1999. Growth and development of cotton plant. In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W.J. dos. (Ed.). *Cultura do algodoeiro*. Piracicaba: POTAFOS, pp. 35-55.
- Qin Z, Karnieli A., Berliner P., 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18): pp. 3719–3746.
- Rao, P.K., 1972. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 53, pp. 647-648.
- Richards, J.A., Jia, X., 2000. *Remote sensing digital image analysis – an introduction*. Germany, Springer, p. 363.
- Rosolem, C.A., 2010. *Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro*. POTAFOS: *Informações Agronômicas* N° 95, 9p.

Shimakura, S.E., 2006. "Estatística II-Regressão." Laboratório de Estatística e Geoinformação. Departamento de Estatística da UFPR.

De Sousa, S.B., Júnior, L.G.F., 2012. Relação entre temperatura de superfície terrestre, índices espectrais e classes de cobertura da terra no município de Goiânia (GO). *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 26.

Tatsumi, K., Yamashiki, Y., Torres, M.A.C., Taibe, C.L.R., 2015. Crop classification of upland fields using Random forest of time-series Landsat 7 ETM+ data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, pp. 171-179.

Vallejos, M., Volante, J.N., Mosciaro, M.J., Vale, L.M., Bustamante, M.L., Paruelo, J.M., 2015. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geodatabase from 1976 to 2012. *J. Arid Environ.* 123, pp. 3–11.

Weng, Q., 2010. *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*. New York: McGraw-Hill, pp. 397.