

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DOUGLAS ALBERTO DE OLIVEIRA SILVA

INTERFERÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO EM VARIÁVEIS AMBIENTAIS
UTILIZADAS PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS NO MUNICÍPIO DE
PETROLINA - PE

RECIFE – PE

2017

DOUGLAS ALBERTO DE OLIVEIRA SILVA

**INTERFERÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO EM VARIÁVEIS AMBIENTAIS
UTILIZADAS PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS NO MUNICÍPIO DE
PETROLINA - PE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - PPGEA da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo.

Orientador: Fabrício Marcos de Oliveira Lopes

RECIFE – PE

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586i Silva, Douglas Alberto de Oliveira
Interferência da precipitação em variáveis ambientais utilizadas
para detecção de mudanças no município de Petrolina – PE /
Douglas Alberto de Oliveira Silva. – 2017.
72 f. : il.

Orientador: Pabricio Marcos de Oliveira Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências.

1. Caatinga 2. Degradação 3. Albedo 4. NDVI I. Lopes, Pabricio
Marcos de Oliveira, oriente. II. Título

CDD 631

DOUGLAS ALBERTO DE OLIVEIRA SILVA

**Interferência da Precipitação em Variáveis Ambientais Utilizadas para Detecção
de Mudanças no Município de Petrolina – PE**

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes
Universidade Federal Rural de Pernambuco - DA

Prof. Dr. Roberto Carlos Gomes Pereira
Universidade Federal Rural de Pernambuco - DA

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura
Universidade Federal Rural de Pernambuco - DA

Prof. Dr. Enio Farias de França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco - DEAGRI

RECIFE – PE

2017

DEDICO:

Ao Senhor Deus e ao seu filho Jesus
Cristo;

À toda minha família, em especial a
minha mãe Carmem Lucia de Oliveira
Silva;

Aos meus irmãos Renata e Maycon;

A todos os amigos.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Ao “SENHOR DEUS PAI e ao seu FILHO JESUS CRISTO” por toda grandeza na minha vida agraciando-me sempre com muita saúde para lutar, enfrentar e superar todos os obstáculos da vida e diante da mesma pelo grandioso amor, por toda paz e proteção nessa jornada.

Em especial, a minha mãe Carmem Lucia de Oliveira Silva pelo inimaginável e insubstituível amor, carinho, compreensão e incentivo, jamais realizaria essa etapa sem o primeiro de muitos degraus que me concederam, devo ao conjunto dos dois tamanha conquista nos dias de hoje e nos demais que virão. Aos meus irmãos Renata Silva e Maycon Iago por sempre acreditarem na minha pessoa e, que assim, também consegui encontrar forças para continuar e atingir esse sucesso.

Ao Professor orientador Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes por toda confiança, paciência e por tamanha orientação, é exemplo de um grande educador, um profissional com imensa educação e humildade, amigo rico em conhecimentos relevantes seja profissional ou pessoal, dos quais consegui adquirir boa parte e colocar em prática na realização desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura, também grande educador e profissional rico em conhecimentos, agradeço pelo incentivo, pelas considerações e pela disponibilidade em sempre ajudar da melhor forma.

Aos Professor Dr. Roberto Carlos Gomes Pereira pela disponibilidade em fazer parte do corpo examinador, por tamanho profissionalismo, sempre muito esclarecedor e atencioso e, principalmente pelas contribuições diante desta pesquisa.

À renomada Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pela oportunidade de fazer parte do corpo discente. Em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a todo corpo docente, em nome dos respectivos Coordenador e Vice-Coordenador Professor Ênio França Farias e Silva e Dr. Mário Monteiro Rolim, pela estrutura da Pós-Graduação, pelo apoio e insistência nas demais atividades que os comprometem.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, importantíssima para o cumprimento das atividades durante todo o período de realização da pesquisa e pelo incentivo a pesquisa científica de modo geral.

À Professora Dra. Cristina Rodrigues Nascimento pela disponibilidade em fazer parte da banca examinadora.

À Manuel Cunegundes Capano pela disponibilidade diante das informações e a importante ajuda em todos os processos administrativos.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade e repasso dos dados meteorológicos, essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa científica.

Aos amigos encontrados e existentes no PGEA em geral, seja no mestrado ou no doutorado, todos aqueles que foram companheiros nas disciplinas, no almoço e nos estudos particulares. Agradeço em especial, aos meus amigos Fábio Ferreira, Anna Hozana, Francisco Sanguino, Antonio Gebson, Sisgo Rachith, Renato Augusto, Pedro Henrique, Bruno Eduardo, Carlos Roberto, José Diorgenes, com vocês foram ótimos dias de aprendizado e, principalmente pelas brincadeiras que tanto deram também grande sentido à vida a cada dia, diante da felicidade de todos.

Meu muito OBRIGADO a todos...

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 CAATINGA	16
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO	17
3.3 LANDSAT-8	18
3.4 PRECIPITAÇÃO PLUVIAL	19
3.5 SATÉLITE TRMM	20
3.6 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA - FAST LINE-OF-SIGHT ATMOSPHERIC ANALYSIS OF SPECTRAL HYPERCUBES (FLAASH)	22
3.7 DETECÇÃO DE MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	23
3.8 ÍNDICE DE DESVIO PADRÃO MÓVEL (MSDI)	24
3.9 NDVI (NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX)	25
3.10 ALBEDO DA SUPERFÍCIE	26
3.11 CLASSIFICAÇÃO POR ÁRVORE DE DECISÃO	26
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1 ÁREA DE ESTUDO	27
4.2 DADOS DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	28
4.3 PRODUTOS DO SATÉLITE TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION (TRMM)	30
4.4 MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MULTIPLA	30
4.5 AVALIAÇÃO DO GRAU DE AJUSTAMENTO DO MODELO	30
4.6 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	31
4.7 IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT-8	32
4.8 REFLECTÂNCIA CORRIGIDA DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS	33
4.9 FUSÃO DE IMAGEM	34
4.10 DETECÇÃO DE MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL	34
4.11 ALBEDO DA SUPERFÍCIE	34
4.12 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)	34
4.13 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO (SAVI)	35
4.14 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)	35
4.15 EMISSIVIDADES DA SUPERFÍCIE	35

4.16	TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE	36
4.17	ÍNDICE DE DESVIO PADRÃO MÓVEL (MSDI);.....	36
4.18	CLASSIFICAÇÃO POR ÁRVORE DE DECISÃO	36
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	PRECIPITAÇÃO	38
5.2	ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	40
5.3	ALBEDO DA SUPERFÍCIE.....	42
5.4	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (NDVI).....	45
5.5	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (SAVI).....	48
5.6	MAPA DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL	51
5.7	Temperatura da superfície.....	56
5.8	Magnitude da mudança	58
5.9	Detecção de mudanças	59
6.	Conclusão	61
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
8.	Anexos	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caatinga Arbórea fechada.....	17
Figura 2. Caatinga Antropizada.	17
Figura 3. Caatinga Arbórea aberta.	17
Figura 4. Área de caatinga salinizada.....	17
Figura 5. Relação entre o brilho e intensidade de verde em diferentes tipos de cobertura do solo no vermelho e infravermelho próximo.....	243
Figura 6. Mapa de localização das estações meteorológicas automáticas no município de Petrolina-PE.	277
Figura 7. Mapa de Solos do município de Petrolina-PE. Fonte: adaptado de http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html	288
Figura 8. Diagrama com as etapas do processamento das imagens.	33
Figura 9. Classificação por árvore de decisão para inferir sobre o grau de degradação ambiental no município de Petrolina - PE.	37
Figura 10. Classificação por árvore de decisão do grau de degradação ambiental no município de Petrolina – PE na plataforma ENVI.	37
Figura 11. Precipitação pluvial mensal para o município de Petrolina-PE para os anos de 2013, 2014 e 2015.	38
Figura 12. Carta temática do albedo da superfície no município de Petrolina – PE nas datas nas datas de 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).	44
Figura 13. Histogramas de frequência correspondentes: A (2013); B (2014); C (2015).	45
Figura 14. Cartas temáticas do índice de vegetação (NDVI) no município de Petrolina – PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).	47
Figura 15 Carta temática do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) no Município de Petrolina – PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).	49
Figura 16. Estatísticas da área de degradação do município de Petrolina e adjacentes em 2013, 2014 e 2015.....	54
Figura 17. Mapa de degradação do município de Petrolina-PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).	56
Figura 18. Mapa temático da temperatura da superfície (Ts, °C) no Município de Petrolina-PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).	58
Figura 19. Mapa temático da Magnitude da mudança do município de Petrolina-PE.	59
Figura 20. Mapa temático da detecção de mudança do município de Petrolina-PE.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma	19
Tabela 2. Descrição geral dos instrumentos a bordo do TRMM.....	21
Tabela 3. Coordenadas geográficas das estações meteorológica automáticas.	29
Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson (r).....	31
Tabela 5. Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação.	31
Tabela 6. Metadados das imagens no dia da passagem do Landsat-8.....	32
Tabela 7. Classificação de anos normais, secos e chuvosos com baseando no método do quantil do município de Petrolina-PE (MOURA et al., 2010).	39
Tabela 8. Coeficientes do modelo de precipitação acumulada para dois dias (PAC2) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), coeficientes α e β , Erro Padrão de estimativa para Petrolina-PE.	41
Tabela 9. Coeficientes do modelo de precipitação acumulada para 45 dias (PAC45) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Petrolina-PE.	42
Tabela 10. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do albedo corrigido da superfície.	45
Tabela 11. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do índice de vegetação NDVI.....	48
Tabela 12. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).	50
Tabela 13. Regra para avaliação da degradação, utilizando imagens Landsat.....	51
Tabela 14. Área e porcentagem da degradação no município de Petrolina e adjacência nos períodos de 2013, 2014 e 2015.....	53
Tabela 15. Precipitação acumulada antecedentes a passagem do satélite.....	71
Tabela 16. Precipitação acumulada estimada pelo satélite TRMM.	72

SILVA, D. A. O. **Interferência da precipitação em variáveis ambientais utilizadas para detecção de mudanças no município de Petrolina - PE**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

Autor: Douglas Alberto de Oliveira Silva
Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RESUMO: Nos últimos anos, com o avanço do sensoriamento remoto baseado em imagens de satélite, tornou-se possível o monitoramento de grandes áreas dos diversos biomas existentes no mundo. Neste contexto, é possível analisar e interpretar possíveis mudanças na superfície da Terra acarretadas por processos sejam eles naturais e ou mesmo antrópicos. Objetivou-se com o presente estudo analisar a interferência da precipitação acumulada nas variáveis ambientais utilizadas na detecção de mudanças na ocupação e uso da terra no município de Petrolina-PE, utilizando-se dados de superfície e imagens dos satélites TRMM e Landsat-8, para os anos de 2013 a 2015. Técnicas de sensoriamento remoto foram utilizadas para estimar os índices de vegetação, albedo, temperatura da superfície e precipitação acumulada de 02, 08, 16, 30, 45, 60, 75, 105, 115 e 120 dias antes da passagem do satélite Landsat-8. Em seguida, a precipitação acumulada das estações meteorológicas automáticas foi correlacionada com parâmetros biofísicos e precipitação acumulada do satélite TRMM. A precipitação acumulada foi modelada utilizando regressão linear múltipla. A técnica de detecção de mudança e a classificação por árvore de decisão foram aplicadas para inferir sobre ocupação e uso da terra. Os resultados mostraram que os índices de vegetação e as técnicas de monitoramento da degradação e detecção de mudanças identificaram satisfatoriamente o comportamento da vegetação circundante no município de Petrolina – PE, destacando-se como indicadores de áreas em processo de degradação no semiárido. Conclui-se que a chuva acumulada em 2 e em 45 dias antes da passagem do satélite Landsat-8 correlacionou-se muito bem com os parâmetros biofísicos. A precipitação alterou mais o albedo e a temperatura da superfície. Além disso, a técnica de detecção de mudança e classificação por árvore de decisão foram eficientes na identificação de áreas antropizadas durante os três anos estudados.

Palavras-chave: Albedo; Caatinga; Degradação; NDVI.

SILVA, D. A. O. Interference of precipitation in environmental variables used to detect changes in the municipality of Petrolina-PE. 2017. 72 f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco - UFRPE.

Autor: Douglas Alberto de Oliveira Silva
Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

ABSTRACT: In recent years, with the advancement of remote sensing based on satellite images, it has become possible to monitor large areas of the various biomes in the world. In this context, it is possible to analyze and interpret possible changes in the surface of the Earth caused by processes that are natural or even anthropic. The objective of this study was to analyze the influence of accumulated precipitation on the environmental variables used to detect changes in occupancy and land use in the city of Petrolina-PE, using surface data and images of the TRMM and Landsat-8 satellites for the years from 2013 to 2015. Remote sensing techniques were used to estimate vegetation indices, albedo, surface temperature and accumulated precipitation of 02, 08, 16, 30, 45, 60, 75, 105, 115, 120 days before the passage of the Landsat-8 satellite. Then, the accumulated precipitation of the automatic weather stations were correlated with the biophysical parameters and the accumulated precipitation of the TRMM satellite. The accumulated precipitation was modeled using multiple linear regression. The change detection techniques and decision tree classification were applied to infer about occupancy and land use. The results showed that the vegetation indexes and the techniques of monitoring the degradation and detection of changes, satisfactorily identified the behavior of the surrounding vegetation in the city of Petrolina - PE, standing out as indicators of areas in the process of degradation in the semiarid. It is concluded that cumulative precipitation in 2 and 45 days before the passage of the Landsat-8 satellite correlated very well with biophysical parameters and TRMM data. Precipitation interfered more with albedo and surface temperature. In addition, the change detection techniques and decision tree classification were efficient in identifying anthropic areas during the three years studied.

Keywords: Albedo; Caatinga; Degradation; NDVI.

1. INTRODUÇÃO

O Bioma Caatinga possui uma área aproximada de 826.411 km² e se estende por todo o Nordeste, representando 83% do estado de Pernambuco (IBGE, 2017). Mesmo sendo a única grande região natural brasileira cujos limites estão inteiramente restritos ao território nacional, pouca atenção tem sido dada à conservação da heterogênea da paisagem da caatinga (SILVA et al. 2004).

O sistema agropastoril exerce uma grande pressão sobre a cobertura vegetal na Caatinga e essa pressão varia de intensidade em função da localização, estrutura e tamanho dos remanescentes (MMA, 2010). Essas atividades antrópicas vêm potencializando a intensificação das mudanças na cobertura e uso da terra na região semiárida do Brasil. Atualmente, o bioma apresenta 1% de área protegida por Unidade de Conservação de Proteção Integral (UCs) e 6,4% de área protegida por Unidade de Conservação de Uso Sustentável. Para minimizar o problema, os órgãos federais e estaduais vêm desenvolvendo ações para criação de novas UCs de forma a obter representação significativa de todas as tipologias vegetais da caatinga. Dentre as áreas prioritárias sugeridas para a criação de UCs, o município de Petrolina está inserido, pois o mesmo apresenta pressão antrópica elevada, devido as áreas de irrigação e de agricultura de sequeiro.

O monitoramento das áreas de UCs pode ser feito utilizando-se imagens de satélite que proporcionam uma visão geral, além de possibilitar um monitoramento temporal, proporcionando um fortalecimento da proteção desse bioma (MMA, 2010). A identificação de áreas antrópicas, como também na fiscalização e combate a desmatamentos ilegais nesse bioma, permite uma maior eficiência das políticas públicas voltadas à conservação e uso sustentável do bioma.

As imagens de índices de vegetação e de albedo da superfície são influenciadas pela precipitação antes da passagem do satélite, que pode mascarar a variabilidade espacial destes parâmetros e na interpretação da mudança do uso e cobertura da terra em datas distintas. A precipitação pode ser determinada também por satélites meteorológicos ou por dados de superfície. O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) é um ferramenta para suprir a falta de dados medidos de precipitação pluviométrica (OLIVEIRA et al., 2014). Os dados de precipitação do TRMM e das estações meteorológicas podem ser utilizados para analisar a interferência desta nos produtos de satélite: Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI),

albedo e temperatura da superfície (T_s). Com isso, é possível entender o grau de influência da água acumulada nas imagens de reflectância espectral, antes da passagem do satélite, para melhorar a descrição dos parâmetros físicos e biofísicos na detecção e classificação de mudanças do uso e cobertura da terra. Maffra (2005) calculou o acúmulo de chuva quatro dias antes á aquisição da imagem para estudar a umidade do solo através da análise multitemporal de imagens multiespectrais (Landsat ETM e ASTER) e regional (MODIS). Desta forma, os autores concluíram que a modelagem do acumulado de chuva através de imagens MODIS, obteve bom resultado tanto nas regressões múltiplas como na modelagem através do algoritmo GMDH.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a interferência da precipitação acumulada nas variáveis ambientais para detecção de mudanças do uso e ocupação do solo no município de Petrolina-PE, utilizando-se de dados de superfície e de satélites.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar e avaliar os índices de vegetação, albedo e temperatura da superfície para detectar alterações no uso e na cobertura da terra;
- ✓ Avaliar a influência da precipitação acumulada sobre os parâmetros físicos e biofísicos;
- ✓ Classificar o grau de degradação do município de Petrolina utilizando árvore de decisão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CAATINGA

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, o que significa que grande parte do seu patrimônio biológico não pode ser encontrado em nenhum outro lugar do planeta. Este nome decorre da paisagem esbranquiçada apresentada pela vegetação durante o período seco: a maioria das plantas perde as folhas e os troncos tornam-se esbranquiçados e secos. A Caatinga ocupa uma área de cerca de 850.000 km², cerca de 10% do território nacional (DRUMOND et al. 2012). Originalmente, o bioma Caatinga recobria quase todo o semiárido nordestino, entretanto, corresponde a aproximadamente 54% da região Nordeste (SILVA et al., 2004; IBGE, 2016; BATISTA; SANTOS, 2013). O clima dominante é o semiárido, apresenta baixos valores de precipitação anual (menos de 431,8 mm).

A Caatinga localizada entre os paralelos de 2° 54' S a 17° 21' S e compreende áreas dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Piauí, partes do interior da Bahia e do norte de Minas Gerais (CAATINGA, 2011).

A vegetação de Caatinga reúne ambientes muito distintos, sendo caracterizada pela predominância de árvores e arbustos baixos, ramificados, espinhosos e com folhagem decídua na estação seca (BATISTA; SANTOS, 2013). Aproximadamente, 46% do bioma caatinga já foram desmatados, sendo que 60% das áreas susceptíveis à desertificação no Brasil estão na Caatinga (DRUMOND et al. 2012). As Figuras 1, 2, 3, 4 retratam as diferenças das formações da caatinga arbórea fechada, caatinga Arbórea aberta e áreas de caatinga antropizadas no município de Petrolina-PE.

O semiárido brasileiro apresenta os piores índices de desenvolvimento humano do país. Em geral, isso se repete para os demais índices sociais e econômicos. Entretanto, a região vem nos últimos anos crescendo mais do que a média nacional e os índices sociais vêm melhorando, fruto do maior investimento público na região e das políticas sociais destinadas as regiões de caatinga (DRUMOND et al. 2012).



Figura 1. Caatinga Arbórea fechada.



Figura 3. Caatinga Arbórea aberta.



Figura 2. Caatinga Antropizada.



Figura 4. Área de caatinga salinizada.

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é tido como um conjunto de técnicas destinado à obtenção de imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, isto ocorre por meio da captação e do registro de energia refletida ou emitida pela superfície (FLORENZANO 2002; SILVA; CÂMARA; SCADA, 2008).

Segundo Bezerra et al. (2013), o sensoriamento remoto tem assumido papel de grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, oferecendo suporte nas previsões de tempo e melhor entendimento das mudanças climáticas. Vários autores vêm analisando a superfície terrestre por meio do sensoriamento remoto (BEZERRA, 2013; GÓMEZ et al., 2011; CUNHA et al., 2012).

As técnicas de sensoriamento remoto vêm se mostrando como uma alternativa com boa precisão e baixo custo para estudos das mudanças da superfície como também na estimativa do balanço de radiação e de energia na superfície em escala regional (MACHADO et al., 2014). Com isto, o sensoriamento remoto torna-se uma poderosa ferramenta para obtenção de informações sobre manejo de recursos naturais, tais como água, solo e vegetação. Um dos algoritmos mais usados no sensoriamento remoto é o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen (1995).

Di Pace et al. (2008), utilizando imagens Landsat-5, analisaram os principais índices biofísicos da superfície na região do submédio São Francisco. Neste estudo, os autores estimaram por meio de técnicas do sensoriamento remoto a emissividade, NDVI (Índice de Vegetação por diferença normalizada), albedo, temperatura da superfície e saldo de radiação.

3.3 LANDSAT-8

O programa Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) foi desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no final da década de 60, tendo por objetivo coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não renováveis da superfície terrestre. O programa Landsat contou com o lançamento de oito satélites. Atualmente, encontra-se em operação o Landsat-8, o mais moderno da família Landsat (USGS, 2015).

O satélite Landsat-8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, descrito como Landsat8/OLI, trouxe consigo novas possibilidades para a pesquisa no que diz respeito à produção de dados e informações espaciais, apresentando um conjunto de novos sensores: sensor espectral OLI (*Operation Land Imager*) e o sensor termal TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), que agregaram melhorias na resolução espectral, causando mudanças nos intervalos espectrais dos canais de todas as bandas (USGS, 2015).

O satélite Landsat-8 apresenta órbita praticamente polar, posicionando-se de maneira heliossíncrona a uma altitude de aproximadamente 705 km. Conforme apresentado na Tabela 1, os sensores a bordo do satélite Landsat-8 possuem faixa de imageamento de 170 km norte-sul por 185 km leste-oeste, apresenta resolução temporal de aproximadamente 16 dias com um campo de visada de aproximadamente 15° e

resolução espacial de 30 m para as bandas do visível, 15 m para banda pancromática (PRATES et al., 2014). Ao contrário dos satélites anteriores que têm apenas uma banda infravermelha termal, o Landsat-8 apresenta o sensor TIRS que possui uma nova tecnologia que mede a radiação termal da superfície terrestre em duas bandas (REN et al., 2014). Os dados Landsat-8 são processados em uma imagem de 185 km x 180 km com aproximadamente 950 MB em formato GeoTiff. Todas as bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS são armazenadas em arquivo de número digital de 16-bits (PEREIRA, 2015).

Tabela 1. Características espectrais das bandas dos sensores a bordo da plataforma Landsat-8.

SATÉLITE LANDSAT-8		
Sensores		
Características	Operational Land Imager (OLI) Bandas 1 a 9 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Bandas 10 e 11	Resolução espacial
Largura de Faixa	170 km x 185 km	
Bandas espectrais	Banda 1 Coastal aerosol (0,43-0,45 μm)	30 m
	Banda 2 Azul (0,450-0,51 μm)	
	Banda 3 Verde (0,53-0,59 μm)	
	Banda 4 Vermelho (0,64-0,67 μm)	
	Banda 5 Infravermelho próximo (0,85-0,88 μm)	
	Banda 6 SWIR 1 (1,57-1,65 μm)	15 m
	Banda 7 SWIR 2 (2,11-2,29 μm)	
	Banda 8 Pancromática (0,50-0,68 μm)	15 m
	Banda 9 Cirrus (1,36-1,38 μm)	100 m
	Banda 10 Infravermelho termal TIRS 1 (10,6-11,19 μm)	
	Banda 11 Infravermelho termal TIRS 2 (11,5-12,5 μm)	
Res. Radiométrica	16 bits	
Projeção	Projeção UTM, Datum WGS 1984	
Revisita	16 Dias	
Órbita	Heliossíncrona (altitude de 705 Km)	

Fonte: USGS (2015).

3.4 PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

A precipitação pluvial é um dos fatores com grande relevância no âmbito nacional e global para a determinação das condições de tempo e clima das distintas regiões brasileiras, constituindo-se um forte indicador da disponibilidade de água nas bacias. Sendo assim, é de suma importância quantificar a chuva e sua distribuição no

tempo e no espaço, pois esta variável está diretamente ligada às diversas atividades agrícolas, principalmente na região do submédio São Francisco (ALVES; AZEVEDO, 2015).

Apesar de sua grande importância em nível regional e global, como já mencionado anteriormente, existe um déficit de dados pluviométricos, principalmente, pela baixa densidade de estações meteorológicas e pela exigência de que os equipamentos medidores (pluviômetros) e registradores (pluviógrafos) estejam em boas condições de funcionamento (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2014).

3.5 SATÉLITE TRMM

O satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) foi lançado em 1997 pela NASA (*National Aeronautics and Space Agency*) em conjunto com a JAXA (*National Space Development Agency of Japan*) com o objetivo de monitorar a precipitação sobre os trópicos (KUMMEROW et al., 2000). O TRMM possui três sensores principais utilizados na avaliação da precipitação: o imageador de micro-ondas TRMM (*TRMM Microwave Imager – TMI*); o radar de precipitação (*Precipitation Radar – PR*) e o sistema de radiômetro visível e infravermelho (*Visible and Infrared Radiometer System – VIRS*); estes medem a temperatura, potência e radiância (Tabela 2). A partir de suas combinações obtêm-se a estimativa de precipitação pluvial (GONÇALVES, 2011). Este satélite é o mais bem equipado em termos de instrumentos para estimativa de precipitação, fornecendo dados mais precisos do que técnicas indiretas, baseadas em imagens de outros satélites (BARRERA, 2005).

Para estimar a precipitação, o satélite TRMM combina os dados de microondas passivo (*HQ – High Quality Microwave Estimates*) com dados de infravermelho (*VAR – Variable Rain Rate IR Estimates*) (BIAZETO, 2007). Com isto, para que se tenha grau de confiabilidade satisfatório, torna-se necessário à validação desses dados com os dados das medidas de superfície, visando quantificar sua precisão e exatidão.

Tabela 2. Descrição geral dos instrumentos a bordo do TRMM.

Sensor	Descrição
Sistema de Radiômetro visível e infravermelho (VIRS)	VIRS é um radiômetro de varredura de cinco canais, cross-track operando a 0,63; 1,6; 3,75; 10,8 e 12 μm , que fornece observações de alta resolução em cobertura de nuvens, tipo de nuvem e em temperaturas no topo das nuvens.
Imageador Micro-ondas do TRMM (TMI)	O TMI é um radiômetro de micro-ondas passivo multicanal operando em cinco frequências: 10,65; 19,35; 37,0 e 85,5 GHz a dupla polarização e 22,235 GHz a única polarização. A TMI fornece informações sobre o conteúdo integrado de coluna de precipitação, nuvem, água líquida, nuvem de gelo, intensidade da chuva e os tipos de chuva.
Radar de Precipitação – PR	O PR é um radar de varredura eletrônica, operando a 13,8 GHz, que mede a distribuição de chuvas 3-D sobre terra e mar, e definir a profundidade da camada de precipitação.
Sensor de imageamento de raios - LIS	O LIS é um sensor óptico passivo que detecta e localiza eventos de raios na faixa do oxigênio (0,777) μm .
Sistema de nuvens e energia radiante da Terra – CERES	Os dados CERES podem ser usados para estudar a energia trocada entre o Sol, a atmosfera e a superfície terrestre. No entanto, o sensor só funcionou de janeiro de 1998 à março de 2000, portanto, o registro de dados disponíveis é bastante curto (NASA, 2015; ANJOS et al., 2016).

Fonte: adaptado de <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/TRMM>

No Brasil, vários resultados relacionados à validação do uso do TRMM na estimativa da precipitação foram encontrados, como pode-se citar a análise feita por Collischonn (2006) que encontrou erros relativos de 9% para a precipitação acumulada anual comparada por dados de superfície, sendo esse resultado aproximado com o de Nóbrega et al., (2008) em que comparou os dados do TRMM com os de “*Climate Prediction Center*” (CPC), assim como os das estações meteorológicas da Sub-Bacia da Amazônia Ocidental. Anjos et al. (2016) analisaram as estimativas do satélite TRMM na Microrregião de Itaparica em Pernambuco, incluindo as estimativas totais e os tipos de chuvas e sua relação com fenômenos climáticos como o El Niño e La Niña.

Em um estudo comparativo com dados de postos pluviométricos e estimativas do TRMM, Anjos e Nóbrega (2013) observaram que o erro entre os dados estimados e

observados diminuem do litoral para o sertão em Pernambuco. Baseando-se nesses resultados é importante o entendimento da diferença dos erros para um melhor aproveitamento dos dados do satélite na gestão de riscos de desastres naturais e monitoramento ambiental.

3.6 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA - *FAST LINE-OF-SIGHT ATMOSPHERIC ANALYSIS OF SPECTRAL HYPERCUBES (FLAASH)*

A reflectância obtida pelo sensor do satélite é a mistura do sinal da atmosfera e da superfície, denominada de reflectância planetária. Essa reflectância pode ser corrigida dos efeitos de espalhamento e absorção atmosféricos provocados pelos aerossóis por meio da utilização de códigos de transferência radiativa, tais como o MODTRAN (*Moderate Resolution Transmission Model*) (<http://modtran.spectral.com/>). O modelo MODTRAN foi implementado no aplicativo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)*, que utiliza o código de transferência radiativa MODTRAN4+ do programa Envi (ADLER-GOLDEN, 1999; BERK et al., 2002; MATTHEW et al., 2002).

O módulo FLAASH destina-se a correção atmosférica nas imagens hiperespectrais e multiespectrais (FELDE et al., 2003). O FLAASH foi desenvolvido pela empresa Spectral Sciences, em colaboração com a AFRL (*U. S. Air Force Research Laboratory*) e com os pesquisadores da SITAC (*Spectral Information Technology Application Center*) criado desde 1989 (MATTHEW et al., 2000). Para Kaufman et al (1997), o módulo FLAASH baseia-se em modelos físicos e incorpora o código de transferência de radiação MODTRAN4+ para caracterizar a atmosfera e eliminar efeitos causados por partículas de vapor d'água, aerossol e gases como o ozônio, dióxido de carbono, etc. Neste modelo, a correção dos efeitos atmosféricos é realizada de acordo com a Equação 1:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho \epsilon S} \right) + \left(\frac{B \rho \epsilon}{1 - \rho \epsilon S} \right) + L\alpha \quad (1)$$

Em que: L = radiância no sensor; ρ = reflectância de superfície do pixel (é a média da reflectância de superfície do pixel e da região vizinha); S = albedo esférico da atmosfera; $L\alpha$ = radiância retroespalhada na atmosfera; A e B = parâmetros que dependem das condições da atmosfera e da geometria de iluminação (COOLEY et al.,

2002; ADLER-GOLDEN et al., 1999; ANDERSON et al., 1999). O MODTRAN é capaz de estimar os valores de A, B, S e $L\alpha$ para uma dada condição atmosférica e, assim, determinar a radiância da superfície e em seguida, a reflectância para cada banda da faixa óptica de um determinado satélite.

3.7 DETECÇÃO DE MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O método da diferença vetorial das reflectâncias no vermelho e infravermelho próximo é baseado na presunção de que as mudanças na cobertura da superfície da terra podem ser caracterizadas por um vetor, indicando a mudança de um pixel no espaço do vermelho e infravermelho próximo em diferentes momentos, por meio das assinaturas espectrais conhecidas de cada tipo de cobertura (ZHAN et al., 2000).

A magnitude do vector é utilizada para determinar se existe mudança. Com isto, se a cobertura da superfície não sofre de variação, a assinatura espectral não muda, conseqüentemente, o vetor de mudança tem uma magnitude próxima ou igual à zero. Caso haja mudança o vetor irá se deslocar, em geral, de baixo brilho e alta intensidade de verde para alto brilho e baixa intensidade de verde, se ocorrer queima da superfície tanto o brilho e a intensidade de verde irão diminuir, logo, o vetor de mudança correspondente se deslocará paralelamente, mas no sentido negativo para o eixo do vermelho e infravermelho próximo (Figura 5) (HUANG et al., 1998; ZHAN et al., 1998; ZHAN et al., 2000).

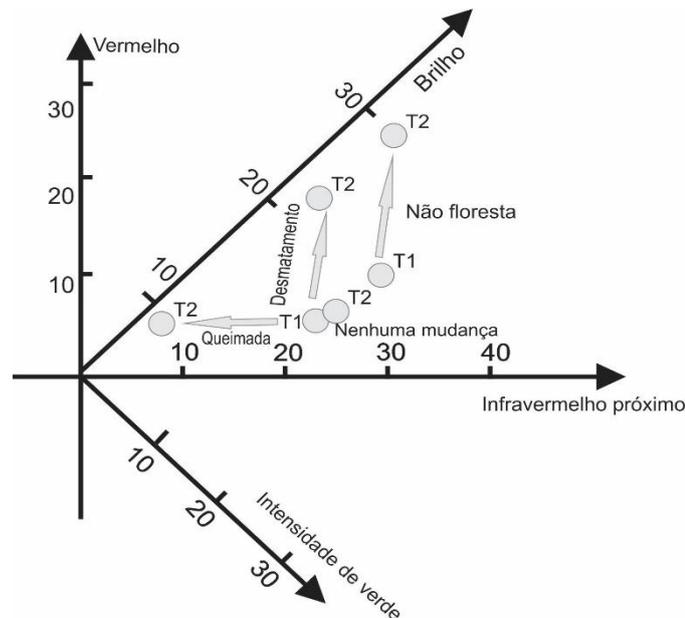


Figura 5. Relação entre o brilho e intensidade de verde em diferentes tipos de cobertura do solo no vermelho e infravermelho próximo. Fonte: Adaptado de Zhan et al. (2000).

A detecção de mudança do uso e ocupação do solo por meio de imagens de satélite ocorre pela análise de um par de imagens adquiridas da mesma área geográfica, em datas diferentes, com o objetivo de identificar possíveis alterações ocorridas (BOVOLO e BRUZZONE, 2005).

São vários os exemplos de aplicação de detecção de mudanças. Santos e Lingnau (2013) avaliaram a aplicação da técnica de sensoriamento remoto na detecção de mudanças no monitoramento do uso e ocupação do solo em áreas atingidas por catástrofe ambiental. Haynes e Sader (2001) analisaram o NDVI para a detecção de mudanças em clareiras florestais e regeneração florestal e constataram resultados significativos para o método aplicado.

3.8 ÍNDICE DE DESVIO PADRÃO MÓVEL (MSDI)

O MSDI é um índice derivado de um filtro de desvio padrão móvel em toda a faixa do vermelho. Baseia-se na medição da heterogeneidade da paisagem, com isto, torna-se um parâmetro importante para determinar o estado de degradação de uma área (TANSER, 1999). A variabilidade da paisagem representa uma medida da mudança do ecossistema que representa o processo de degradação. Segundo o autor, a hipótese consiste em que as paisagens saudáveis, não perturbadas, e estáveis tendem a ser menos variável e homogênea do que as paisagens heterogêneas degradadas.

O MSDI é um indicador sensível da condição da paisagem, não sendo afetado pela disponibilidade de umidade e tipo de vegetação. Sendo assim, o MSDI mostra uma significativa relação negativa para com o NDVI. Jafari (2007) estudou as condições de terras áridas usando imagens multiespectrais de Landsat ETM+, para isto, foram utilizados alguns índices de vegetação e o MSDI. Duanyang et al. (2009) e Xue et al. (2009) analisaram a desertificação por meio de árvores de decisão utilizando imagens multiespectrais, que teve como indicadores de desertificação o albedo, o índice de vegetação NDVI e o MSDI.

3.9 NDVI (NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX)

O NDVI ou IVDN (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) proposto por Rouse et al. (1973) é um índice utilizado principalmente em estudos ambientais, pois é possível fazer análises sobre a cobertura vegetal de determinada região em diversas escalas. Tratando-se de pesquisas com imagens de satélite, o NDVI é um índice muito utilizado, pois, reduz o efeito topográfico e apresenta uma escala de medida linear entre -1 e 1 (PRATES et al., 2014).

Nos últimos anos, vários autores vêm estudando os índices biofísicos, com o intuito de analisar a superfície terrestre e o melhor entendimento das mudanças climáticas. Prates et al. (2014) utilizaram o NDVI para a classificação de uso do solo, para o município de Nova Lima em Minas Gerais. Bezerra et al. (2014) monitoraram os parâmetros biofísicos da Caatinga em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. Barbosa et al. (2006) estudaram a heterogeneidade espacial e dinâmica temporal da região Norte do Brasil usando uma série temporal de 20 anos de observações de NDVI.

1.12. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

A temperatura da superfície é um elemento de grande valor dos processos físicos, químicos e biológicos da superfície terrestre em escala regional e global, que estão relacionados ao balanço de energia, evaporação, desertificação e pode ser utilizada como um indicador de degradação terrestre (ZHANG et al., 2009).

Atualmente, a temperatura da superfície (T_s) estimada por imagens termais, tem sido alvo de vários estudos, como por exemplo, a banda 10 do sensor TIRS do *Landsat* 8, com diversos algoritmos, como o SEBAL (GUSMÃO et al., 2013; SOUZA et al., 2016).

Souza et al. (2016) observaram as mudanças do uso e ocupação no solo em diferentes classes, com imagens orbitais do sensor TM, para o município de João Pessoa – PB e observaram os maiores valores de temperatura da superfície sobre área urbana e solo exposto e, de acordo com a variação encontrada identificaram um aumento da área urbana em praticamente todas as porções do Município.

3.10 ALBEDO DA SUPERFÍCIE

Albedo da superfície é a razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar incidente em uma superfície (YANAGI, 2006). Constitui um parâmetro importante em estudos de mudanças climáticas e desertificação (SILVA et al., 2005b). O albedo é um parâmetro muito importante na estimativa do balanço de energia da superfície terrestre, sendo bastante utilizado em modelos climáticos e agrometeorológicos, tais como estimativas do saldo de radiação, dentre outros.

Muitos estudos têm sido realizados com o propósito de determinar o albedo da superfície com sensores orbitais. Podem ser destacadas as pesquisas de Bezerra et. al (2014), Silva et al. (2005b), Oliveira et al. (2015), Gamarra et al. (2014).

3.11 CLASSIFICAÇÃO POR ÁRVORE DE DECISÃO

As árvores de decisão são modelos estatísticos que utilizam um treinamento supervisionado para a classificação e previsão de dados. Em outras palavras, em sua construção é utilizado um conjunto de treinamento formado por entradas e saídas. Estas últimas são as classes (MITCHELL, 1997). A árvore de decisão é considerada prática e muito usada em inferência indutiva. Este método representa funções como árvores de decisão. Uma árvore de decisão é formada por um conjunto de nós de decisão, perguntas, que permitem a classificação de cada caso. As árvores de decisão têm sido um importante meio de suporte a decisões nos mais variados campos, mas especialmente em projetos (BODILY, 1985).

Vários autores têm estudado as mudanças na superfície da terra por meio de árvore de decisão. Zhan et al. (2000) analisaram a mudança da cobertura da terra por meio do produto NDVI 250 m do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, utilizando a árvore de decisão no processamento das imagens para obter os indicadores da detecção de mudança da cobertura da terra. Duanyang et al. (2009) avaliaram as mudanças na cobertura da terra e na desertificação usando NDVI e albedo por meio de árvore de decisão.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o retângulo envolvente do município de Petrolina-PE ($7^{\circ}37'35''\text{S}$ a $9^{\circ}43'56''\text{S}$; $41^{\circ}12'11''\text{O}$ a $39^{\circ}7'27''\text{O}$; altitude média de 370m) (Figura 6), pertencente a mesorregião do São Francisco Pernambucano, estando à aproximadamente 714 km da capital Recife. O Município está inserido na região semiárida de Pernambuco, apresentando um bioma de Caatinga, está situado na depressão sertaneja, com um relevo suave-ondulado, integrando um importante polo da fruticultura nacional.

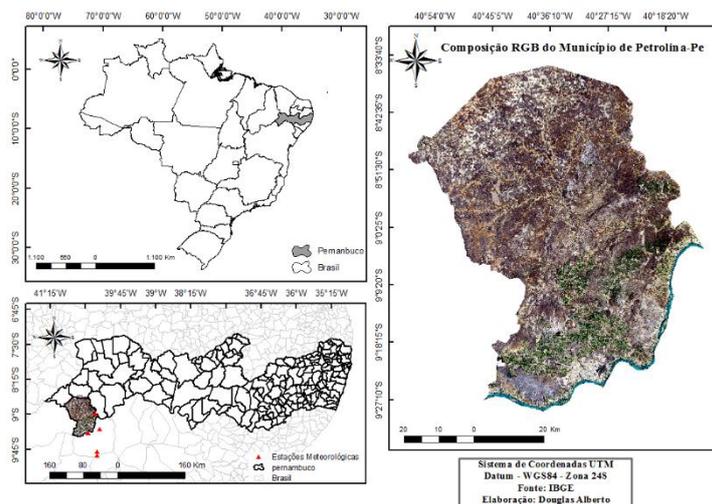


Figura 6. Mapa de localização das estações meteorológicas automáticas no município de Petrolina-PE.

De acordo com a Classificação climática de Köppen-Geiger, Petrolina está em uma região que apresenta o clima do tipo BSwH – semiárido (quente e seco), com a ocorrência de duas estações bem definidas: estação seca entre os meses de maio a

outubro e estação chuvosa entre os meses de novembro a abril. Apresenta uma precipitação pluviométrica média de 431,8 mm/ano, concentradas em um único período do ano e com uma distribuição espacial irregular, temperatura média anual de 26,4°C e umidade relativa do ar de 58% (SILVA et al., 2005a).

A maior parte territorial de Petrolina apresenta solos mais profundos e desenvolvidos, destacando-se as seguintes classes: Argissolos Vermelho-Amarelos e Amarelos, ambos Eutróficos plínticos e não plínticos, abruptos ou não abruptos. Em menores proporções ocorrem áreas de Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, Neossolos Quartzarênicos Distróficas, Neossolos Litólicos Eutróficos, Planossolos Nátricos e Planossolos Solódicos (SILVA et al., 2005a) (Figura 7). A capacidade máxima de água disponível estimada varia de 50 a 100 mm (ROSSETO, 2002) no Município.

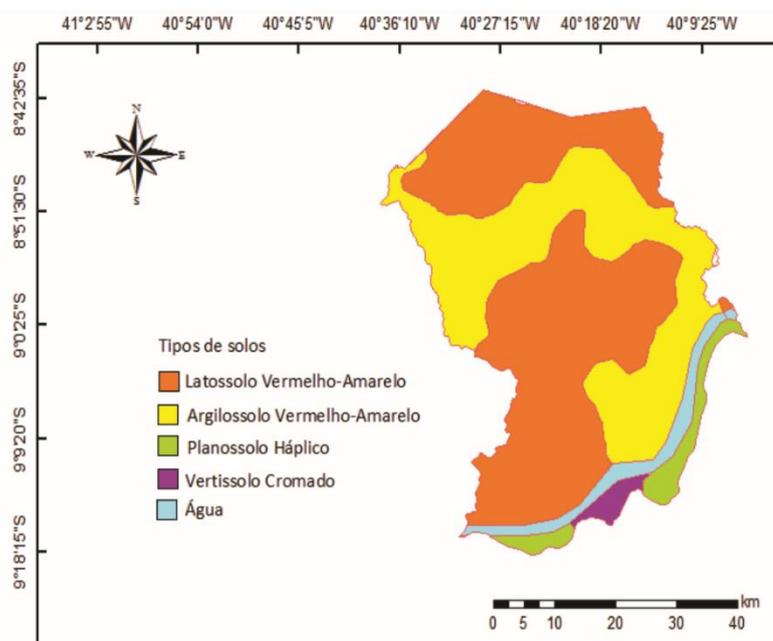


Figura 7. Mapa de Solos do município de Petrolina-PE. Fonte: adaptado de <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html>.

4.2 DADOS DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Os dados diários da precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar de quatro estações meteorológicas automáticas e uma convencional do município de Petrolina e vizinhança foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (www.inmet.gov.br), pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos

Climáticos (www.cptec.in.br) e pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (www.apac.pe.gov.br) para o período de 2013 a 2015. As coordenadas geográficas das estações meteorológicas automáticas e da convencional encontram-se na Figura 6 e Tabela 3.

Tabela 3. Coordenadas geográficas das estações meteorológica automáticas.

Estação	Tipo de estação	Latitude	Longitude	Altitude
Petrolina – INMET	Automática	9° 22' 45,12'' S	40° 28' 47,25'' W	373m
Petrolina - PCD	Automática	9° 9' 0'' S	40° 22' 1,2'' W	370m
Petrolina – UNIVASF	Automática	9° 19' 28'' S	40° 33' 34'' W	379m
Lagoa Grande	Automática	8° 59' 5,15'' S	40° 16' 48,33'' W	370m
Juazeiro – Mandacaru	Convencional	9° 24' 0'' S	40° 26' 0'' W	371m
Juazeiro – UNIVASF	Automática	9° 26' 56'' S	40° 31' 27'' W	368m

As precipitações das seis estações meteorológicas foram acumuladas para 2, 8, 16, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias antes da passagem do satélite Landsat-8.

Os dados de precipitações acumulados também foram utilizados para inferir sobre a reflectância da banda do vermelho (ρ_4) do satélite Landsat-8, a reflectância da banda do infravermelho (ρ_5) do satélite Landsat-8, o albedo, o NDVI, o SAVI, o IAF, o TRMM e a T_s .

O método usado para selecionar os anos extremos de precipitação foi a "técnica dos quantis", pois procura interpretar de forma adequada o verdadeiro significado de um total pluviométrico. Na Tabela 7 são apresentados a classificação de anos normais, secos e chuvosos do município de Petrolina-PE.

4.3 PRODUTOS DO SATÉLITE TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION (TRMM)

Os dados acumulados de precipitação pluvial para 2, 8, 16, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias, antes da passagem do satélite Landsat-8, foram obtidos do produto 3B42 do satélite TRMM disponíveis em <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>. Os produtos TRMM são disponíveis no formato hierárquico (HDF) com resolução espacial de 0,25° (cerca de 25 km) e em milímetros. As imagens do TRMM foram pré-processadas no software ENVI, sendo feita a conversão do formato HDF para o GeoTiff e sua respectiva rotação, pois, em seu formato original, apresentam orientação norte.

4.4 MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MULTIPLA

Os modelos de regressão múltiplas foram utilizado para relacionar os valores estimados de TRMM, ρ_4 , ρ_5 , albedo, SAVI, NDVI, IAF e T_s (variáveis independentes) com os valores acumulados de precipitação (PAC) medidas em cinco estações meteorológicas automáticas condicionadas a significância do modelo (coeficiente de determinação e correlação) de probabilidade menor que 5% e o erro padrão de estimativa baixo. Os valores de PAC estimados por um modelo de regressão linear múltipla baseado em dados espectrais e meteorológicos é dado pela Equação 2:

$$Y_i' = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + X_3 \cdot \beta_3 + X_4 \cdot \beta_4 + X_5 \cdot \beta_5 + X_6 \cdot \beta_6 + X_7 \cdot \beta_7 + X_8 \cdot \beta_8 + \varepsilon \quad (2)$$

em que: Y_i' = precipitações acumuladas para 2, 8, 16, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias com dados da EMA (dependente); X_1 = precipitações acumuladas do TRMM para 2, 8, 16, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias (mm); X_2 = reflectância da banda do vermelho do Landsat-8; X_3 = reflectância da banda do infravermelho do Landsat-8; X_4 = albedo da superfície; X_5 = índice de vegetação por diferença normalizada; X_6 = índice de vegetação ajustado ao solo; X_7 = índice de área foliar (m^2/m^2); X_8 = temperatura da superfície ($^{\circ}C$); ε = erro padrão, α , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 , β_6 , β_7 , β_8 = parâmetros a serem estimados. Escolheu-se os melhores modelos de regressão múltiplas.

4.5 AVALIAÇÃO DO GRAU DE AJUSTAMENTO DO MODELO

Para verificar o grau de ajustamento, foram calculados os respectivos coeficientes de determinação e o grau da correlação foi verificado através da Tabela 4, proposta por Devore (2006), que indica o grau de ajuste pelos coeficientes de correlação de Pearson (r). No trabalho foi utilizado o programa Statistica.

Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson (r).

R	Definição
0,00 a 0,19	Correlação Bem Fraca (CBF)
0,20 a 0,39	Correlação Fraca (Cf)
0,40 a 0,69	Correlação Moderada (CM)
0,70 a 0,89	Correlação Forte (CF)
0,90 a 1,00	Correlação Muito Forte (CMF)

Fonte: Devore (2006)

4.6 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

O coeficiente de variação (CV) é usado para analisar a dispersão em termos relativos a seu valor médio quando duas ou mais séries de valores apresentam unidades de medida diferentes. Dessa forma, podemos dizer que o CV é uma forma de expressar a variabilidade dos dados excluindo a influência da ordem de grandeza da variável (<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/matematica/coeficiente-variacao.htm>). O CV é obtido pela razão entre o desvio-padrão e a média. Quanto menor for o valor de CV, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média. De uma forma geral, se o CV:

For menor ou igual a 15% = baixa dispersão: dados homogêneos;

For entre 15 e 30% = média dispersão;

For maior que 30% = alta dispersão: dados heterogêneos

4.7 Índice Kappa

O Índice Kappa (K) é uma medida da concordância real (indicado pelos elementos diagonais da matriz de confusão) menos a concordância por chance (indicado pelo produto total da linha e coluna, que não inclui entradas não reconhecidas), ou seja, é uma medida do quanto à classificação está de acordo com os dados de referência.

A Tabela 5 apresenta níveis de desempenho da classificação para o valor de Kappa obtido, Galparsoro e Fernández (2001).

Tabela 5. Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação.

Índice Kappa	Desempenho
< 0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom

Fonte: Adaptado de Galparsoro e Fernández (2001).

Para avaliar a acurácia dos classificadores na construção dos mapas temáticos foi utilizado o índice Kappa, juntamente com os seguintes parâmetros estatísticos: precisão geral do mapa, precisão de cada classe temática, precisão média das classes, erros de omissão e erros de inclusão (REMOTE SENSING RESOURCES, 2006).

4.8 IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT-8

As imagens dos sensores OLI/TIRS do satélite Landsat-8 estão disponíveis no site <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As bandas 2 a 7 (resolução espacial de 30 m) e a 8 (pancromática 15m) pertencem ao sensor OLI, enquanto que a banda termal 10 (100m) ao sensor *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. As cenas do Landsat-8, que cobrem a área de estudo, possuem órbita 217 e pontos 66 e 67, condição de céu claro com menor presença de nuvens possível (<10%) e pertencentes ao mesmo período do ano. Na Tabela 6 estão representados os metadados das imagens no dia e hora da passagem do satélite Landsat-8 na cidade de Petrolina-PE.

Tabela 6. Metadados das imagens no dia da passagem do Landsat-8.

Datas	Hora	Latitude	Longitude	DJ ⁽¹⁾	E ⁽²⁾	Z ⁽³⁾
14/12/2015	12:47:52	8° 40' 1,78"S	40° 9' 31,1"S	348	60,546	29,453
12/11/2015	12:47:50	8° 40' 37,67"S	40° 9' 22,18"S	316	64,848	25,152
27/10/2105	12:47:50	8° 40' 37,7"S	40° 9' 51,66"S	300	65,969	24,031
28/01/2105	12:47:51	8° 40' 37,7"S	40° 9' 51,76"S	28	67,66	22,34
24/08/2015	12:47:31	8° 40' 37,85"S	40° 48' 55,33"S	236	55,172	34,828
22/09/2014	12:47:50	8° 40' 37,74"S	40° 08' 30,19"W	265	62,348	27,652
05/08/2014	12:47:45	8° 40' 36,70"S	40° 09' 56,02"W	217	51,118	38,882
02/06/2014	12:47:21	8° 40' 36,23"S	40° 10' 04,62"W	153	48,879	41,121
05/10/2013	12:49:37	8° 40' 36,91"S	40° 09' 37,51"W	278	65,128	24,872
03/09/2013	12:49:47	8° 40' 37,56"S	40° 10' 37,49"W	246	58,280	31,720
30/05/2013	12:49:42	8° 40' 37"S	40° 09' 32,44"W	151	47,699	42,301

⁽¹⁾ Dia juliano, ⁽²⁾ Elevação (graus), ⁽³⁾ Ângulo Zenital do Sol (graus).

Para atender os objetivos propostos, a metodologia constituiu em uma combinação de procedimentos (etapas), conforme o fluxograma na Figura 8.

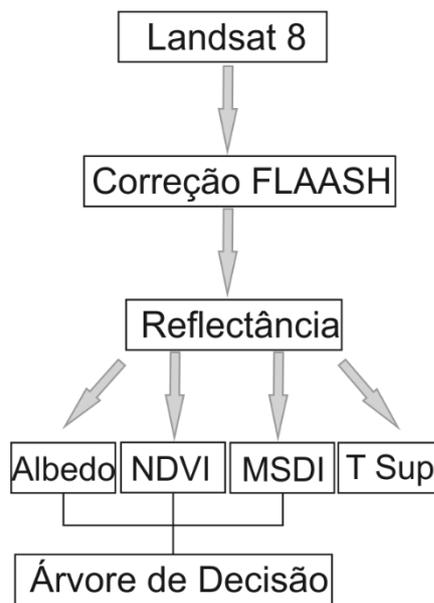


Figura 8. Diagrama com as etapas do processamento das imagens.

4.9 REFLECTÂNCIA CORRIGIDA DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS

Para realizar a correção atmosférica das imagens do Landsat-8 utilizando o aplicativo FLAASH foi necessário informar a data, horário, local da passagem do Landsat-8 e também o tipo de modelo atmosférico (usou-se Tropical), tipo de aerossóis (usou-se o continental) e o valor da visibilidade horizontal (VIS). A visibilidade horizontal foi estimada invertendo-se a Equação 3 proposta por (DESCHAMPS et al., 1981; OLIVEIRA et al., 2009; VASCONCELOS, 2016):

$$\beta = 0,613 \times e^{-VIS/15} \quad (3)$$

em que: β = coeficiente de Ångström que foi obtido utilizando a calculadora disponível no site www.patarnott.com/office/analyzeSunPhotometerUNR.pl que necessita do valor da pressão atmosférica (usou-se 850 mb), data e hora da passagem do satélite Landast-8, latitude e longitude do ponto central da cena, comprimento de onda central da banda 3 (561,25nm). A calculadora forneceu o valor da profundidade óptica de 0,0857. Com o valor de profundidade óptica e considerando-se o expoente de Ångström $a = -1,3$ (PINTO, 2001), obteve-se $\beta = 0,18$ e a visibilidade horizontal de 18,26 km.

4.10 FUSÃO DE IMAGEM

A técnica de fusão de imagens foi utilizada para fusionar as bandas de resolução espacial de 30 m para a resolução espacial de 15 m (banda pancromática, integração das faixas visível ao infravermelho próximo do Landsat-8), melhorando o detalhamento das cenas. As fusões das bandas 2, 3 e 4 foram feitas por meio da ferramenta de fusão de imagens “Componentes Principais” do programa ERDAS IMAGINE versão 9.1 (QUARTAROLI e BATISTELLA, 2005). Após as bandas serem fusionadas, foi feita a classificação de imagens por meio da fotointerpretação da composição em cor natural RGB (4R, 3G, 2B).

4.11 DETECÇÃO DE MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL

A detecção de mudanças de cobertura da superfície da terra foi determinada por meio do método da diferença vetorial das refletâncias das bandas 4 e 5 do Landsat-8. A magnitude da mudança é calculada a partir dos valores de reflectância das bandas 4 e 5 no tempo 1 (mês analisado) e tempo 2 (mês posterior ao mês analisado) expresso pela equação 4 (ZHAN et al., 2000):

$$A = \sqrt{(\Delta\rho_4)^2 + (\Delta\rho_5)^2} \quad (4)$$

Em que: A = magnitude da mudança; ρ_4 = refletância do vermelho; e ρ_5 = refletância do infravermelho próximo.

4.12 ALBEDO DA SUPERFÍCIE

O albedo da superfície representa a quantidade de radiação refletida pela superfície em cada pixel com correção atmosférica, obtido pelo módulo FLAASH. O albedo foi calculado conforme a Equação 5 a seguir (SILVA et al., 2005b):

$$\alpha = -62,2 \times \rho_2 - 57,3 \times \rho_3 - 48,3 \times \rho_4 - 29,5 \times \rho_5 - 7,3 \times \rho_6 - 2,4 \times \rho_7 \quad (5)$$

Em que α = albedo da superfície; ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , ρ_5 , ρ_6 e ρ_7 = reflectâncias de cada banda do Landsat-8.

4.13 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

O NDVI foi computado pela razão entre a diferença das reflectâncias do infravermelho-próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V) pelo somatório das mesmas reflectâncias conforme a Equação 6:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (6)$$

Em que: ρ_{IV} e ρ_V = bandas 4 e 5, respectivamente do Landsat-8 sensor OLI.

4.14 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO (SAVI)

O índice de vegetação ajustado as condições do solo (*Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI*), é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, conforme Equação 7 (HUETE, 1988).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (7)$$

Em que: ρ_{IV} e ρ_V = bandas reflectivas 4 e 5, respectivamente, do Landsat-8 OLI; L = constante de ajuste ao solo, que depende do tipo de solo, o valor mais utilizado é 0,5 (HUETE e WARRICK, 1990; ACCIOLY et al., 2002; SILVA et al., 2005b). Embora, geralmente utiliza-se o valor de 0,1 devido à estudos mais recentes, como proposto por Allen et al. (2007) e Silva et al. (2011b).

4.15 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

Através da obtenção do **SAVI** é possível obter o índice de área foliar (**IAF**). O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, podendo ser estimada de acordo com Allen et al. (2007), descrita pela Equação 8.

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

4.16 EMISSIVIDADES DA SUPERFÍCIE

Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ϵ_{NB} (10,4 – 12,5 μm). Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 (5 – 100 μm). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades de cada pixel (ϵ_{NB}), podem ser obtidas e validadas, segundo a equação 9:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times IAF \quad (9)$$

As equações acima são válidas para as seguintes condições: pixels com valores de $IAF \geq 3$, considera-se $\epsilon_{NB} = 0,98$. Para $NDVI < 0$, $\epsilon_{NB} = 0,99$ (ALLEN et al., 2002).

4.17 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

Depois de serem determinadas as emissividades prossegue-se com a temperatura da superfície (T_s), para a obtenção da mesma utilizou-se a radiância espectral da banda termal L_{b10} do Landsat-8 OLI e a emissividade ϵ_{NB} obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície, em Kelvin (ALLEN et al., 2002), através da Equação 10 a seguir:

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{NB} \times K_1}{L_{b10}} + 1 \right)} \quad (10)$$

Em que, K_1 e K_2 ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) = constantes de calibração da banda termal (L_{b10}), extraídos do metadados das imagens que foram trabalhadas.

4.18 ÍNDICE DE DESVIO PADRÃO MÓVEL (MSDI);

O MSDI representa o desvio padrão calculado por meio de um filtro de 3×3 aplicado na banda 4 do Landsat-8, conforme Equação 11.

$$MSDI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (DN_i - \overline{DN})^2}{N}} \quad (11)$$

Em que: N = número de pixels do filtro 3×3 , ou seja, $N = 9$; DN_i = valor do pixel; \overline{DN} = valor do número digital médio de cada janela de nove pixels.

4.19 CLASSIFICAÇÃO POR ÁRVORE DE DECISÃO

As cartas temáticas de degradação ambiental no município de Petrolina foram estimadas a partir da classificação por árvore de decisão. As regras de classificação por árvore de decisão utilizadas neste trabalho foram estabelecidas segundo a metodologia de Xu et al. (2009) e adaptada para a realidade do semiárido conforme a Figura 9. A árvore de decisão foi construída a partir de imagens de NDVI, Albedo e MSDI. Resultando em um fluxograma no qual o nó interno representa um teste com um

atributo (Figura 10), correspondendo a uma classe, o ramo corresponde ao resultado do teste e a classe esperada é exibida pelo nó externo.

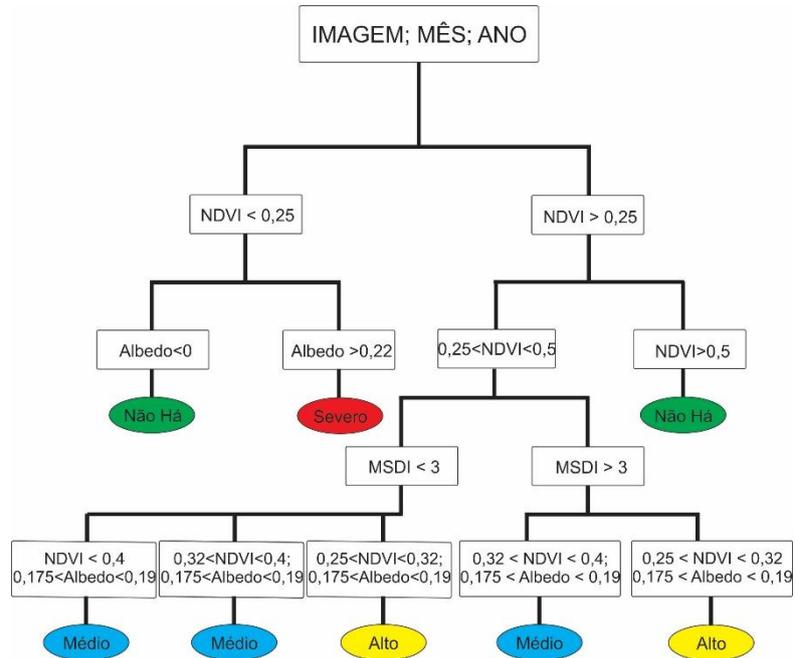


Figura 9. Classificação por árvore de decisão para inferir sobre o grau de degradação ambiental no município de Petrolina - PE.

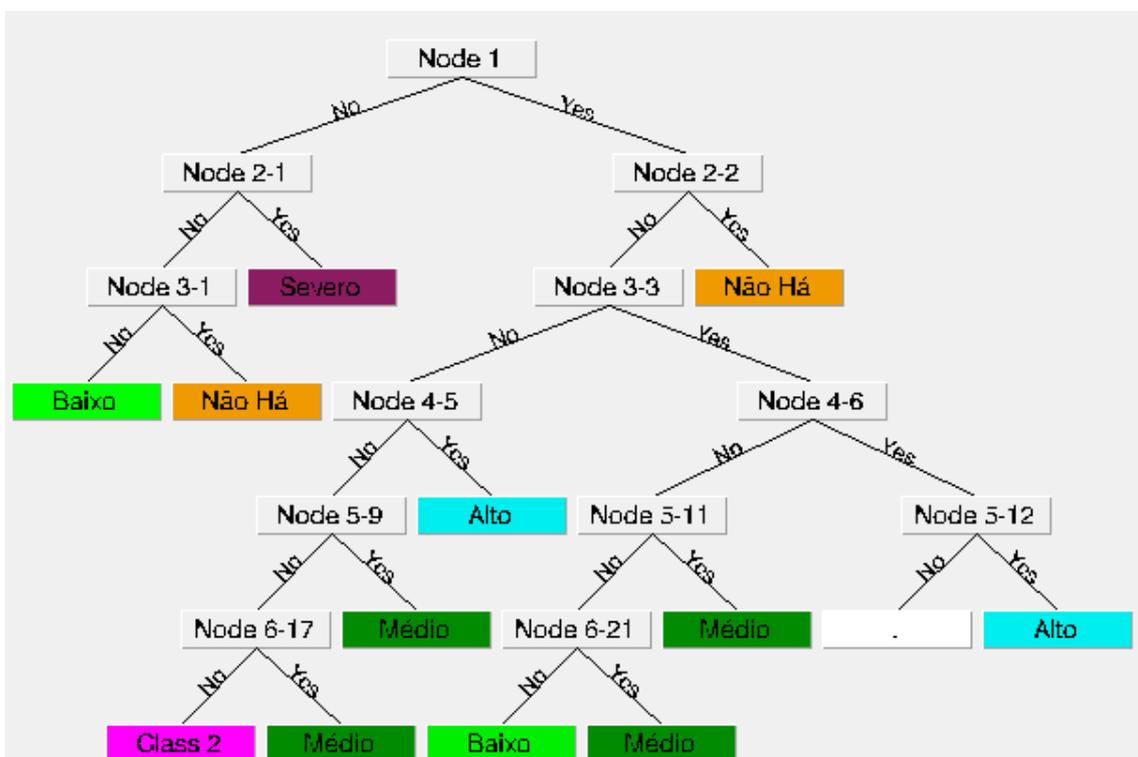


Figura 10. Classificação por árvore de decisão do grau de degradação ambiental no município de Petrolina – PE na plataforma ENVI.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PRECIPITAÇÃO

A precipitação pluvial de 2013 a 2015 é mostrada na Figura 11. Em 2013, 2014 e 2015 a estação seca obedeceu à climatologia, ou seja, meses mais secos foram de maio a outubro (Tabela 7). A estação chuvosa desses anos também se comportou de acordo com o padrão climatológico, ou seja, de novembro a abril. Contudo, o volume de água precipitado foi menor em 2013 e 2015, sendo maior em 2014. Segundo o método de classificação dos quantis usado por Moura et al. (2010), os anos de 2013, 2014 e 2015 foram classificados como seco, normal e seco, respectivamente. A precipitação total foi de 334,13 mm em 2013, 481 mm em 2014 de 175 mm em 2015.

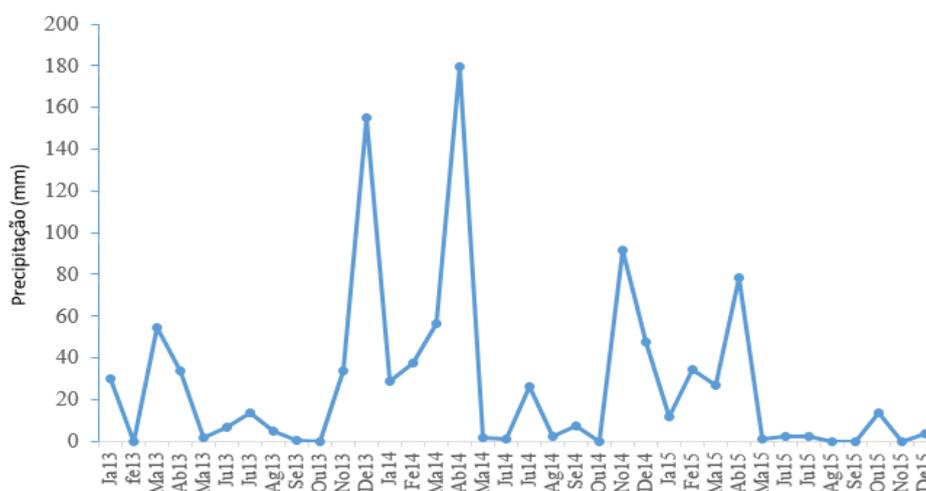


Figura 11. Precipitação pluvial mensal para o município de Petrolina-PE para os anos de 2013, 2014 e 2015.

Tabela 7. Classificação de anos normais, secos e chuvosos com baseando no método do quintis do município de Petrolina-PE (MOURA et al., 2010).

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL (mm)	Cenário Pluviométrico
1993	37	40,5	0	5,9	0	0	1,5	0	0	0	66,8	32,2	183,9	SECO
1994	110,2	156,2	111,8	47,6	3,3	5,7	16,4	0	0	0	4,1	32,2	487,5	NORMAL
1995	134,4	208,5	162,9	19,8	0	0,6	5,4	0,3	0	1,3	74,6	62,8	670,6	CHUVOSO
1996	1,3	59,4	177	43,9	4,2	2,6	0,7	3,6	0,4	0	195,9	48,1	537,1	NORMAL
1997	76,7	32	220,3	30,5	18,3	7,4	1,8	0	0	13	36,2	25,9	462,1	NORMAL
1998	54	54,4	25,4	0	0	0	0	0	0	0	73,3	4,7	211,8	SECO
1999	88,9	33,8	167,1	0	4,2	1,6	0,8	4,6	11,4	6,2	164,9	111,7	595,2	CHUVOSO
2000	76,6	170,4	57,3	67,2	12,6	8,2	0,4	0	3	6,6	125,3	109,7	637,3	CHUVOSO
2001	9,6	70,7	107	0,4	0,4	41,3	7,2	1,2	20,8	0	1,8	67,2	327,6	SECO
2002	256,4	38,3	4,2	20,3	10,3	2,6	1,6	0	1,6	0	11,7	74,2	421,2	NORMAL
2003	134,4	1,6	101,4	43,9	0,6	0	0,8	0,4	3,8	3,8	40,2	44,6	375,5	NORMAL
2004	416,8	138,6	73,8	27,8	17,6	0	0,8	0	0	6,6	7	2,4	691,4	CHUVOSO
2005	35,5	151	69,2	29	21,6	19	4,4	3,8	0	0	58,8	16,6	408,9	NORMAL
2006	0	29,2	139,9	51,7	29,4	3,1	4,8	2,2	7	19,1	46,7	37,2	370,3	NORMAL
2007	0,2	227,8	7,8	77,3	0,7	1,9	3	3,3	0,3	0	30,5	23,2	376	NORMAL
2008	74,6	151,2	275,2	75,9	3,1	5,7	0,2	0	0	0	0	63,1	649	CHUVOSO
2009	40,4	140,4	145,4	181,2	59,3	8,1	3,4	3,4	0	106,1	0	60	747,7	CHUVOSO
2010	28,3	28,4	26,8	84,2	9,6	10,3	21,6	0	4	54	1,1	151,2	419,5	NORMAL
2011	62,2	66,4	63,5	47	9,4	0	0	5,8	0	9,4	8,5	10,7	282,9	SECO
2012	28,9	85,2	0,2	0	0,4	2,3	1,2	1,8	0	0	19,3	1,8	141,1	SECO
2013	30	0	54,8	33,8	1,8	6,8	13,6	4,6	0,4	0	33,6	155	334,4	SECO
2014	28,6	37,5	56,7	179,8	1,6	1,3	26,3	2,4	7,2	0	91,4	47,9	480,7	NORMAL
2015	12	34,6	27,1	78,2	0,8	2,4	2,6	0,1	0	13,7	0	3,6	175,1	SECO

5.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os modelos de regressões lineares múltiplas para as estimativas das precipitações acumuladas para 2 (PAC2) e 45 (PAC45) dias antecedentes a passagem do Landsat-8 no município de Petrolina - PE. Vale ressaltar que os modelos PAC2 e PAC45 apresentaram os melhores coeficientes de correlação (r) e de determinação em comparação com os demais testados. Os modelos apresentaram-se significativo no nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) com intervalo de confiança de 95% para os valores estimados, apresentando bom coeficiente de determinação (R^2), em torno de 64% para PAC2 e de 87% para PAC45. Koster e Suarez (2001) desenvolveram um modelo estatístico e demonstraram que a variabilidade da umidade do solo não só é controlada pelas condições atmosféricas (precipitação e radiação), mas também por processos terrestres superficiais (evaporação e escoamento) e o retorno da umidade do solo para consequentes condições atmosféricas. Lei et al. (2011) reforçam que a variação espaço-temporal da umidade do solo é causada por um efeito abrangente de vegetação, fenômenos meteorológicos (principalmente chuvas), terreno (declividade, orientação de vertentes, altitude e diferenciação geográfica) e atividades agrícolas em diferentes escalas.

Com base na Tabela 8, as variáveis independentes Albedo, SAVI e IAF apresentaram altas significâncias, ou seja, $p < 0,001$, $p < 0,05$ e $p < 0,03$, respectivamente. Para o modelo geral $p < 0,08$ (boa significância). Observou-se que a relação individual de cada variável com a PAC2 teve correlação entre bem fraca a fraca. Por outro lado, levando em conta a influência de todas as variáveis na PAC2 o coeficiente de correlação foi classificado como forte. O albedo, SAVI e ρ_5 tiveram correlação fraca. Isto ocorre porque com dois dias de precipitação acumulada não houve acúmulo de água (Tabela 15). Além disso, na região do infravermelho próximo (ρ_5) a vegetação em boas condições fisiológicas caracteriza-se por alta reflectância, alta transmitância e baixa absorvância quando comparada com a região do visível (ρ_4). Kasmiezac (1993) citado por Maldonado (1999), observou que para regiões de semiárido a banda 5 responde rapidamente ao começo da época úmida, atingindo assim, valores tão altos como os de floresta tropical, no entanto, ocorre o inverso com a ρ_4 .

Tabela 8. Coeficientes do modelo de precipitação acumulada para dois dias (PAC2) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), coeficientes α e β , Erro Padrão de estimativa para Petrolina-PE.

Variáveis independentes	B	r
ρ_4	+0,46	+0,12 ^{CBf}
ρ_5	+0,40	-0,23 ^{Cf}
Albedo	-0,72	-0,23 ^{Cf}
NDVI	-0,23	-0,18 ^{CBf}
SAVI	-1,50	-0,21 ^{Cf}
IAF	+1,42	+0,13 ^{CBf}
Ts	+0,11	-0,10 ^{CBf}
TRMM2	+0,06	-0,05 ^{CBf}
# casos = 20; $\alpha = -0,34$; $r = 0,80^{CF}$; $R^2 = 0,64$; $p < 0,079$		
Erro padrão de estimativa: +0,070		

ρ_4 = reflectância da banda do vermelho; ρ_5 = reflectância da banda do infravermelho; NDVI = Índice de vegetação por diferença normalizada; SAVI = índice de vegetação ajustado ao solo; IAF = índice de área foliar (m^2/m^2); Ts = temperatura da superfície ($^{\circ}C$). CBf = Correlação Bem fraca; Cf = Correlação fraca; CM = Correlação Moderada; CF = Correlação Forte; CMF= Correção Muito Forte.

A Tabela 9 apresenta os coeficientes do modelo de precipitação acumulada para quarenta e cinco dias (PAC45). As variáveis independentes Albedo e a reflectância da banda do vermelho apresentaram elevadas significâncias com $p < 0,0001$, contribuindo, conseqüentemente, para o melhor desempenho na estimativa PAC45. As reflectâncias das bandas 4 e 5 tiveram correlação fraca. Aos 45 dias o acúmulo de água foi considerado bom, influenciando as variáveis estudadas, sendo que o albedo, SAVI e Ts tiveram correlação Moderada. O albedo e a reflectância da banda 4 tiveram correlação negativa inversamente proporcional, isso indica que quando o albedo aumenta a precipitação diminui.

As correlações máximas foram encontradas com a chuva acumulada de 45 dias para a variável TRMM45 com valor de $r = +0,70$, significantes ao nível de 95% de confiança. Esta correlação mais elevada neste caso já era esperada, uma vez que é mais natural que este tipo de correlação aconteça. Algumas exceções podem ser observadas, onde as correlações apresentaram um padrão diferente. Destacam-se as variáveis independentes NDVI ($r = 0,08$) e IAF ($r = 0,18$), que apresentaram baixas correlações, sendo ainda observadas, correlações negativas para o NDVI. Estes resultados destoam dos encontrados por Nicácio et al. (2009) que obtiveram as máximas correlações com a chuva acumulada, com valores em torno de 0,45 e 0,61.

Tabela 9. Coeficientes do modelo de precipitação acumulada para 45 dias (PAC45) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Petrolina-PE.

Variáveis independentes	B	R
P4	+0,65	+0,36 ^{Cf}
P5	-0,01	+0,23 ^{Cf}
Albedo	-0,90	-0,53 ^{CM}
NDVI	-0,31	-0,08 ^{CBf}
SAVI	+0,35	+0,42 ^{CM}
IAF	-0,25	+0,18 ^{CBf}
Ts	-0,09	-0,35 ^{CM}
TRMM45	+0,11	+0,70 ^{CF}
$\alpha = 32,89$; $r = 0,93^{CMF}$; $R^2 = 0,87$ $p < 0,0006$		
Erro padrão de estimativa: +9,78		

5.3 ALBEDO DA SUPERFÍCIE

A Figura 12 apresenta as cartas temáticas dos albedos da superfície (α_{sup}), ou seja, os albedos corrigidos para os efeitos atmosféricos, para dias de céu claro, nas datas de 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

Os valores de albedo mínimo e máximo variaram de 0,0 a 0,80 (Tabela 10). Os valores de albedo corroboram com os dados pluviométricos obtidos do INMET (Tabela 7), uma vez que os anos de 2013 e 2015 foram anos secos, com precipitações abaixo da média anual para a região. Outro fato relevante atribui-se a data do imageamento: (Figura 12 A, B, C, D, E, F, G e H), que coincide ainda, com o período seco para o Município. Os pixels com tonalidades mais próximos do vermelho corresponderam aos maiores valores de albedo. Os altos valores de albedo observados entre 38% até o valor máximo de 80% estão associados à área urbana do município de Petrolina, bem como a áreas de solo exposto agravado pela salinização oriunda da agricultura, estas áreas em geral estão associadas a áreas pouco produtivas, devido ao manejo inadequado dos solos, caracterizando-se, de um modo geral, pela irrigação praticada por pequenos agricultores ao longo das margens do rio São Francisco (Figura 12).

As áreas agrícolas irrigadas com frutíferas como banana, manga goiaba e uva estão representadas de forma retangular e circulares na imagem. As áreas retangulares são consideradas parcelas irrigadas ocupadas por frutíferas, em que a maior parte da área apresentou albedo de até 13%. Ao norte do Município, destaca-se uma grande área de vegetação caatinga preservada com valores de albedo que se confundem com as

áreas irrigadas, na ordem entre 0,0 e 17%. Este fato denota existência de heterogeneidade de cobertura do solo da área. Silva et al. (2005), analisando a mesma área, encontram albedo na ordem de 15 a 25% para áreas com frutíferas e áreas com vegetação nativa variando de 15 a 23%. Já nas áreas de solo expostos os mesmos autores encontraram albedo variando de 30 a 45%, valores esses próximos aos encontrados neste trabalho. Em 2004 Cunha et al. (2009) realizaram um estudo nesta mesma área encontrado valores de albedo de 10 a 26%.

Diante desse contexto, o ano de 2014 foi considerado ano normal, sendo que 2013 e 2015 foram anos considerados como secos, ou seja, não atingiram a média anual esperada para o Município, como também não supriram as necessidades hídricas requeridas das culturas agrícolas. Ressalta-se, por sua vez, que para a data 02/06/2014 (Figura D) registrou nos três meses antecedentes ao imageamento, precipitações pluviométricas de 200,5 mm (Tabela 15), portanto os valores de albedo para esse caso podem ter sofrido alterações, tendo assim, de certa forma uma diminuição, devido à rápida resposta da caatinga predominante na região.

Na observação de um pixel na área de estudo, observou-se valores diferentes diante de distintos usos e ocupações do solo no Município, por exemplo, para um pixel de área irrigada localizado em um pivô central, referentes às cartas de 03/09/2013, 02/06/2014 e 12/11/2015, os valores de albedo encontrados foram de 0,13, 0,095 e 0,18, respectivamente (Figura 12 B, D e I). Na caatinga, os valores foram de 0,27, 0,16 e 0,26, em área de solo exposto foi de 0,54, 0,53 e 0,64, para a área urbana foram observados valores de albedo de 0,55, 0,11 e 0,22, respectivamente. Alguns autores encontraram valores de albedo inferiores aos deste estudo. Giongo et al. (2009), para áreas caracterizadas como área de solo exposto encontraram valores médios superiores a 27% de albedo, bem como Silva et al. (2005) que encontraram valores de solo exposto de 31 e 33% para os anos de 2000 e 2001. Em áreas agrícolas, os valores de albedo encontrados neste estudo corroboram com Giongo et al. (2014) que encontraram valores de albedo entre 13 e 25%, estes resultados estão coerentes com os encontrados da literatura.

Verifica-se, ainda, que o albedo do lago sobradinho bem como o leito do rio São Francisco apresenta tonalidade azul com uma variação de até 5%, conforme a Figura 12. Silva et al. (2005) encontraram valores de albedo para a barragem de sobradinho e o rio São Francisco valores semelhantes aos deste trabalho.

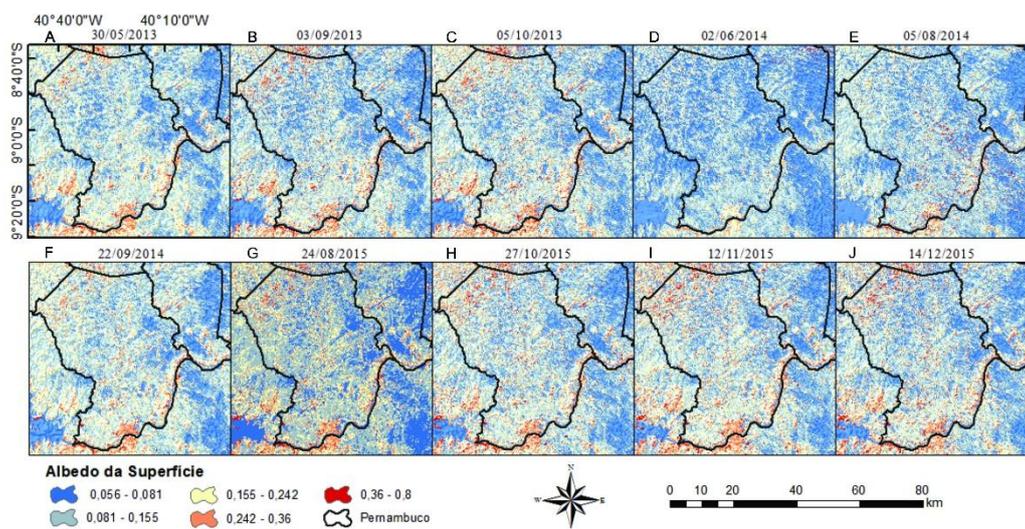


Figura 12. Carta temática do albedo da superfície no município de Petrolina – PE.

Na Tabela 10 estão representados a estatística descritiva, mínimo (Mín.), máximo (Máx.), médio, mediano, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e erro, obtidos na análise das imagens de albedo da superfície.

Os parâmetros estatísticos do DP, CV e Erro mostraram valores, variando de 0,05 a 0,1; 0,59 a 0,74 e 0,001 a 0,003, respectivamente. Para o CV, o valor mínimo foi constatado na data 11/12/2015, enquanto que o máximo em 03/09/2013. O valor mínimo de DP foi observado na data 02/06/2014 e o máximo na data 11/12/2015. O valor máximo do DP indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores, enquanto que o valor mínimo indica que os dados tendem a estar próximos da média. Posto isso, observou-se diante das cartas temáticas dos respectivos dias 03/09/2013; 02/06/2014 e 11/12/2015 (Figura 12 B, D e I) maior variabilidade espacial e temporal, deste modo permitiu-se observar a ação antrópica exercida na área estudada em especial aos distintos usos do solo. Os valores mínimos de albedo próximo a 0 representam corpos d'água como é o caso do rio São Francisco (Figura 12). Os valores entre 0,03 a 0,12 correspondem à área vegetada, em especial área de caatinga preservada (Figura 12).

Tabela 10. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do albedo corrigido da superfície.

Satélite	Datas das Imagens	Albedo corrigido da superfície - α_{sup}						
		Mín.	Máx.	Médio	Mediano	DP	CV	Erro
LANDSAT								
8 OLI/TIRS	03/09/2013	0	0,76	0,14	0,11	0,10	0,74	0,001
8 OLI/TIRS	02/06/2014	0	0,80	0,07	0,05	0,05	0,67	0,001
8 OLI/TIRS	11/12/2015	0	0,80	0,19	0,16	0,11	0,59	0,0003

Na Figura 13 A, B e C estão representados os histogramas de frequência do albedo de todos os pixels da área estudada, nos anos de 2013, 2014 e 2015. Pode-se observar que há duas modas em cada ano, com diferentes valores. A menor delas está definida no ano de 2013, refere-se ao albedo dos pixels correspondente ao lago sobradinho e o leito do rio São Francisco. Em estudos realizados sobre o município de Petrolina, Silva et al. (2005), usando técnicas de sensoriamento remoto, obtiveram resultado semelhantes aos apresentados acima. Os histogramas apresentam uma leve diferença entre os diferentes anos. Este fato pode estar relacionado com a turbidez da lamina d'água ou até mesmo com a correção atmosférica feita no processamento das imagens.

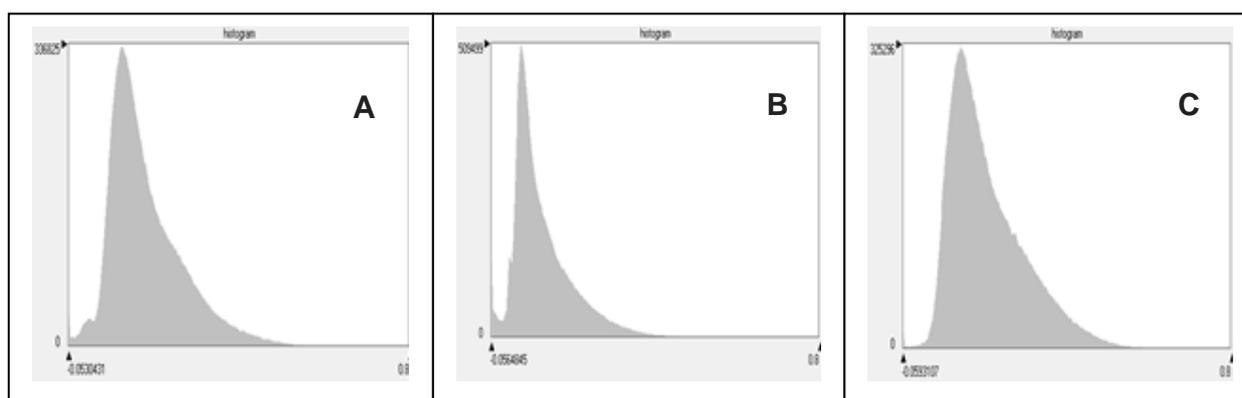


Figura 13. Histogramas de frequência correspondentes: A (2013); B (2014); C (2015).

5.4 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (NDVI)

A Figura 14 apresenta a carta temática do índice de vegetação (NDVI) no município de Petrolina – PE, para as seguintes datas 30/05/2013 (A), 03/07/2013 (B),

05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

Com base nas cartas temáticas do NDVI, nos anos estudados observa-se que os pixels que apresentaram os maiores valores foram atribuídos uma classe com tonalidade azul, esta classe corresponde, principalmente, a áreas irrigadas. Os valores medianos com tons esverdeados correspondem à área mista com presença de caatinga e solo exposto, seguido dos menores valores com tons que vão desde as cores amarela até o marrom, as classes de tons amarelo corresponde a solo exposto, enquanto que as classes de tons marrons com valores negativos correspondem a corpos d'água em especial a barragem de sobradinho e o leito do rio São Francisco que margeia o Município.

Observa-se que o imageamento do dia 02/06/2014 (Figura 14 D), em comparação aos demais, apresentou maior cobertura vegetal. Esse período coincide como a parte final da época chuvosa do Município, onde se observaram na Tabela 7, para os três meses anteriores a esse imageamento, precipitações pluviométricas de 182,7 mm. Isto ocorre porque o município de Petrolina apresenta uma variabilidade sazonal da precipitação definida pela estação chuvosa, que compreende os meses de novembro a abril, e pela estação seca, que ocorre entre os meses de maio e outubro (FERREIRA et al., 2010). O NDVI está relacionado com a precipitação dos meses antecedentes, tendo a caatinga um grande aumento da massa vegetal. Sendo assim, a imagem do dia 02/06/2014 (Figuras 14 D) apresentou maior atividade fotossintetizante, logo, os valores de NDVI tenderam a aumentar, o contrário ocorreu nos demais anos uma vez que com a baixa precipitação dos meses antecedentes ao imageamento de 30/05/2013 (90,4 mm); 03/09/2013 (25 mm); 05/10/2013 (18,6 mm); 22/09/2014 (30 mm); 24/08/2015 (5,8); 27/10/2015 (2,7); 14/12/2015 (13,8 mm); (Figuras 14 A, B, C, E, F, G, H e J) as espécies da caatinga por serem decíduas liberam suas folhas.

Segundo Bustamante et al. (2012), a sazonalidade climática, como a precipitação, influencia a sazonalidade da vegetação. O crescimento anual da caatinga tem relação direta com a sazonalidade climática anual, especialmente da precipitação.

Portanto, ressalta-se, que o significativo aumento do NDVI, relaciona-se com a precipitação dos meses anteriores. Isto ocorre em virtude da rápida resposta da Caatinga as precipitações antecedentes, conseqüentemente, o NDVI é influenciado (ARRAES et al., 2012).

As maiores concentrações de NDVI são encontrados, principalmente, nas áreas agrícolas irrigadas, este fato ocorre para os três anos estudados. A média do NDVI nas áreas irrigadas não mostrou variação expressiva nas datas estudadas, esse comportamento pode ser justificado pela irrigação que proporciona a manutenção do teor de água no solo independente do período chuvoso.

Na observação de um pixel na área de estudo, observou-se valores diante de distintos usos e ocupações do solo no Município, para um pixel de área irrigada localizado em um pivô central para as cartas de 03/09/2013, 02/06/2014 e 12/11/2015 (Figura 14 B, D e I) os valores de NDVI encontrados foram de 0,62; 0,78 e 0,57, respectivamente. Na caatinga, os valores foram de 0,42; 0,93 e 0,44, em área de solo exposto foi de 0,07; 0,098 e 0,075, para a área urbana foram observados valores de NDVI de 0,014; 0,016 e 0,013, respectivamente. Estes dados corroboram com Souza (2014) que encontrou os menores valores na classe de solo exposto (0,01), seguido da área urbana (0,02 e 0,03) para o município de João Pessoa na Paraíba.

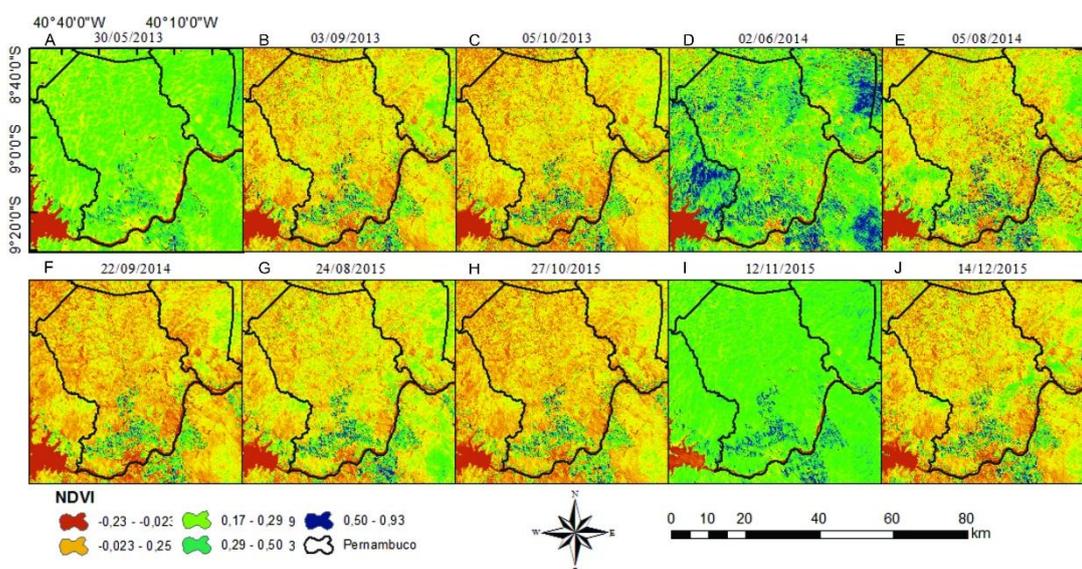


Figura 14. Cartas temáticas do índice de vegetação (NDVI) no município de Petrolina – PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

Na Tabela 11 estão representados os valores dos parâmetros estatísticos, obtidos na análise das cartas do NDVI. Em geral, os respectivos valores mínimos e máximos variaram de -1 a 1, em todos os anos analisados, demonstrando que a área estudada apresenta heterogeneidade. Estes valores são superiores ao encontrado por Silva &

Galvêncio (2012) que, estudando o município de Petrolina, encontraram valores de NDVI entre 0,4 a 0,55. Silva et al. (2016) encontraram nos anos de 2009 a 2011, valores mínimos de 0,61 a 0,64 e máximos de 0,74 a 0,79.

Os valores médios de NDVI observados variaram entre o mínimo de 0,29 para o dia 11/12/2015 e máximo de 0,55 no dia 02/06/2014, concordando-se com os encontrados por Silva e Galvêncio (2012) na mesma região deste estudo, no ano de 2001, com valores médios de NDVI na ordem de 0,28 e 0,36. Oliveira (2012) observou que os valores médios de NDVI variaram na ordem de 0,35 a 0,73, também corresponderam proporcionalmente à precipitação.

Os resultados de desvio padrão variaram entre o mínimo valor de 0,13 no dia 03/09/2013, e o máximo de 0,24 em 02/06/2014. Os valores mínimos e máximos do coeficiente de variação foram de 0,43 em 03/09/2013 e 0,54 para o dia 11/12/2015. Conforme a Tabela 11 observou-se para o ano de 2015, o maior valor de coeficientes de variação, com isso foi observado para os demais anos uma maior variabilidade espacial.

Tabela 11. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do índice de vegetação NDVI.

Satélite LANDSAT	Datas das Imagens	NDVI						
		Mín.	Máx.	Médio	Mediano	DP	CV	Erro
8 OLI/TIRS	03/09/2013	-1	1	0,31	0,31	0,13	0,43	0,0007
8 OLI/TIRS	02/06/2014	-1	1	0,55	0,55	0,24	0,44	0,0006
8 OLI/TIRS	11/12/2015	-1	1	0,29	0,29	0,15	0,54	0,0008

5.5 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (SAVI)

A Figura 15 apresenta a carta temática do índice de vegetação (SAVI) no município de Petrolina – PE. Analisando a Tabela 12 nota-se que dentre todos os índices estudados, o SAVI apresentou os menores valores de desvio padrão e coeficiente de variação, logo, apresentou a menor variabilidade espacial. Portanto, as cartas temáticas do SAVI foram mais homogênea em relação aos demais índices.

Observa-se na Figura 15 D (02/06/2014) para o SAVI, que a classe com tonalidade em azul escuro, representam os pixels com os maiores valores, esta classe corresponde, principalmente, a áreas irrigadas, os valores medianos com tonalidade amarelo correspondem a área mista com presença de caatinga e solo exposto, a classe de

cor marrom representa os menores valores (negativos), que correspondem a corpos d'água que margeia o Município.

Analisando as imagens do dia 05/10/2013 e 12/11/2015 (Figura 15 C e I) nota-se uma ligeira diferença, sendo que a imagem do ano de 2015 apresentou menores valores, diante de tonalidades mais claras. Este resultado está de acordo com o encontrado por Souza (2014) que, ao analisar a cobertura vegetação, encontrou as menores médias sobre a classe dos corpos hídricos e as maiores médias do índice SAVI sobre vegetação arbórea/arbustiva.

Na análise de um pixel na área de estudo, como para o NDVI observou-se diferentes valores diante de distintos usos e ocupações do solo no Município. Para um pixel de área irrigada localizado em um pivô central para as cartas de 03/09/2013, 02/06/2014 e 12/11/2015 os valores de SAVI encontrados foram de 0,48, 0,55 e 0,45, respectivamente. Na caatinga, os valores foram de 0,19, 0,43 e 0,19, em área de solo exposto foi de 0,070, 0,093 e 0,074, para a área urbana foram observados valores de SAVI de 0,09 para todos os anos estudados. Como foi supracitado no parágrafo anterior, também os valores de SAVI nos pixels das diferentes áreas estudadas foram inferiores ao NDVI.

O SAVI (Figura 15) possui os menores valores dos índices quando comparado com NDVI (Figura 14). Diferentemente, Silva et al. (2012) encontraram resultados em que o SAVI possui os maiores valores. Da mesma forma Oliveira et al. (2012) observaram altos valores de SAVI, em relação ao NDVI, estes que estão diretamente associados a salinidade, vigor e densidade da cobertura vegetal.

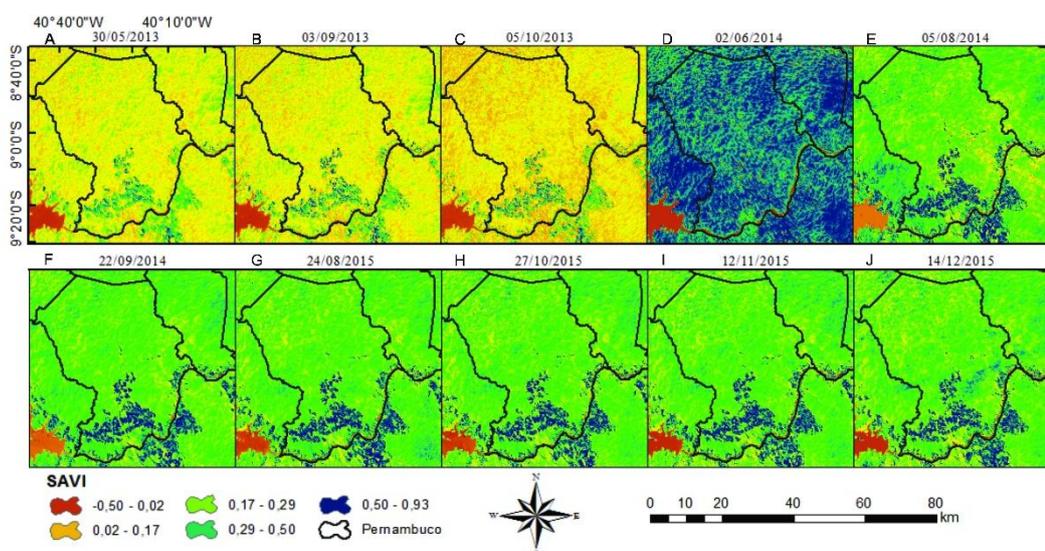


Figura 15. Carta temática do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) no Município de Petrolina – PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013

(C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

Na Tabela 12 estão representados os valores dos parâmetros estatísticos do índice de vegetação SAVI durante o período estudado. Os valores mínimos e máximos variaram de -0,47 e 0,96 para o dia 11/12/2015, respectivamente. Os pixels que apresentaram os valores mínimos (negativos) compreendem os corpos hídricos, o máximo valor foi observado próximo às margens do rio São Francisco, diante das áreas irrigadas ocupadas com fruticultura, ou mesmo para mata ciliar fechada.

Os valores médios do índice SAVI variaram entre o mínimo de 0,18 para o dia 03/09/2013 e máximo de 0,30 no dia 02/06/2014. Ao comparar os índices SAVI e NDVI, observou-se que o SAVI apresenta a mesma resposta encontrada no NDVI diante dos mesmos dias de imageamento. Contudo, mostraram-se correspondentes diante das análises observadas. Os valores medianos variaram de 0,18 no dia 03/09/2013 a 0,29 (02/06/2014). Oliveira et al. (2012), estudando o índice SAVI, determinaram valores mínimos e máximos de 0,28 a 0,62, respectivamente.

Os valores mínimos da mediana foram de 0,18 para as datas 03/09/2013 e 11/12/2015, o valor máximo encontrado foi de 0,29 no dia 02/09/2014. Os valores de desvio padrão variaram para o mínimo no valor de 0,09 no dia 02/09/2014 ao máximo de 0,13 para o dia 02/06/2014. Os valores mínimos e máximos de coeficientes de variação foram de 0,33 em 02/09/2014 e de 0,44 para o dia 11/12/2015. No entanto, o ano de 2015 apresentou maior variabilidade espacial dentre as demais cartas temáticas (Figura 15 GHI e J). Assim, analisando a carta temática de 2015 nota-se maior heterogeneidade na identificação dos diferentes alvos da área estudada, comprovados pelo CV da Tabela 12 a seguir.

Tabela 12. Valores dos parâmetros estatísticos obtidos na análise das cartas do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).

Satélite LANDSAT	Datas das Imagens	SAVI						
		Mín.	Máx.	Médio	Mediano	DP	CV	Erro
8 OLI/TIRS	03/09/2013	-0.58	0,95	0,19	0,18	0,10	0,36	0,0003
8 OLI/TIRS	02/06/2014	-0.62	0,92	0,30	0,29	0,13	0,33	0,0007
8 OLI/TIRS	11/12/2015	-0.47	0,96	0,18	0,18	0,09	0,44	0,0004

5.6 DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

Os conjuntos de regras de indicadores para cada classe de degradação ambiental estão listados na Tabela 13. A área estudada apresenta grande heterogeneidade, fato este que foi fundamental para definir o grau de degradação em escala regional.

As classes não há degradação, baixa e degradação severa foram identificadas com precisão usando apenas NDVI e albedo. O MSDI foi usado, principalmente, para distinguir a média e alta degradação (Tabela 13). Xu et al. (2009) desenvolveram modelos para avaliação da desertificação em outras sub-regiões de forma semelhante, obtendo assim, resultados satisfatórios com boa precisão.

Tabela 13. Regra para avaliação da degradação, utilizando imagens Landsat.

Classes de Degradação	Índices		
	NDVI	MSDI	Albedo
Não Há	< 0,25	---	< 0
	< 0,50	---	---
	< 0	---	---
Baixo	< 0,25	---	> 0
Médio	0,32 < e < 0.40	> 3	0.175 < e < 0.19
	0.32 < e < 0.40	< 3	0.175 < e < 0.19
Alto	0.25 < e < 0.32	> 3	0.175 < e < 0.19
	0.25 < e < 0.32	< 3	0.175 < e < 0.19
Severo	< 0.25	---	> 0.22

A Tabela 14 mostra a distribuição das áreas dos mapas de degradação nas classes utilizadas, bem como a acurácia e o Índice Kappa. Analisando a acurácia (Tabela 14), constata-se que os resultados da classificação obtidos foram satisfatórios com acurácia média de 98,49%, a melhor precisão foi encontrada na data de 05/10/2013, 02/06/2014 e 05/08/2014 com acurácia de 99,96%. Outro teste estatístico aplicado aos resultados da classificação, que levou em consideração a matriz de confusão, e representam as discordâncias na classificação foi à estimativa do índice Kappa. Para o kappa foi constatado valor médio de 0,97, o maior valor encontrado foi de 0,99 nas datas, 05/10/2013, 30/05/2013 e para todas as imagens de 2014, o menor observado foi de 0,88 na data 24/08/2015. Com base na Tabela 14, os valores totais do índice Kappa encontrados foram considerados como excelente para todas as imagens. Demarchi, Piroli e Zimback (2011), usando imagens Landsat-5, analisaram as mudanças da

superfície, obtendo assim valores de Kappa bem abaixo dos encontrados neste trabalho, 0,57 classificação considerada “boa” a 0,74 qualidade “muito boa”, respectivamente.

A grande exatidão da classificação das imagens, utilizando o índice Kappa, pode ser explicada pela grande heterogeneidade da área, que por sua vez está relacionada à diferença espectral existente entre os alvos. No entanto, Oliveira et al. (2015), mapeando florestas com imagens TM/Landsat 5 observaram resultados opostos aos observados neste trabalho.

Tabela 14. Área e porcentagem da degradação no município de Petrolina e adjacência nos períodos de 2013, 2014 e 2015.

Data		Não Há	Baixo	Médio	Alto	Severo	Acurácia	Kappa
30/05/2013	Área (ha)	156,14	862,66	11,63	193,01	178,05	99,76	0,99
	Porcentagem (%)	11,14	61,55	0,83	13,77	12,70		
03/09/2013	Área (ha)	123,89	800,87	15,97	220,06	249,32	99,16	0,98
	Porcentagem (%)	8,79	56,80	1,13	15,61	17,68		
05/10/2013	Área (ha)	145,57	873,88	405,00	347,73	33,90	99,96	0,99
	Porcentagem (%)	8,06	48,39	22,42	19,25	1,88		
02/06/2014	Área (ha)	872,41	367,22	37,43	37,22	82,27	99,96	0,99
	Porcentagem (%)	62,47	26,30	2,68	2,66	5,89		
05/08/2014	Área (ha)	301,89	818,02	8,58	158,85	115,35	99,96	0,99
	Porcentagem (%)	21,52	58,32	0,61	11,32	8,22		
22/09/2014	Área (ha)	158,40	876,72	9,73	227,67	132,92	99,41	0,99
	Porcentagem (%)	11,27	62,38	0,69	16,20	9,46		
24/08/2015	Área (ha)	183,24	885,94	10,47	185,91	143,17	92,99	0,88
	Porcentagem (%)	13,01	62,89	0,74	13,20	10,16		
27/10/2015	Área (ha)	110,94	804,54	21,82	203,81	257,11	97,67	0,96
	Porcentagem (%)	7,93	57,54	1,56	14,58	18,39		
12/11/2015	Área (ha)	121,80	877,02	28,98	189,26	355,87	97,07	0,95
	Porcentagem (%)	7,74	55,76	1,84	12,03	22,62		
14/12/2015	Área (ha)	157,05	819,95	23,72	167,88	238,03	98,92	0,98
	Porcentagem (%)	11,17	58,29	1,69	11,93	16,92		

De acordo com as zonas de diferentes graus de degradação, em três períodos, a degradação teve uma tendência de inversão, embora alguns locais retratam uma expansão da degradação nos anos de 2013 e 2014. Em 2014, quando comparado ao ano de 2013, houve uma reversão da degradação, as áreas cujas classes compreendem a degradação média, alta e severa diminuíram, em contrapartida, a classe não há degradação aumentou substancialmente (Figura 16 e 17). Resultados semelhantes foram observados por Xu et al. (2009) uma vez que houve reversão da degradação na área estuda.

Especificamente, analisando o mês de setembro dos anos de 2013 e 2014, a área de degradação severa regrediu cerca de 116 hectares (8,22%), esta regressão é causada, principalmente, pelas alterações climáticas na área estudada, bem como ao regime de chuvas antecedentes a data do imageamento, uma vez que no ano de 2013 a precipitação acumulada para 02, 08, 16, 30, 45 e 60 dias anteriores ao imageamento foi de 0; 2,8; 2,8; 4,6; 15,6 e 18,2 mm, respectivamente, no entanto, para 2014 a precipitação acumulada foi de 0; 0,7,2;7,2; 9,6 e 35,3 mm respectivamente.

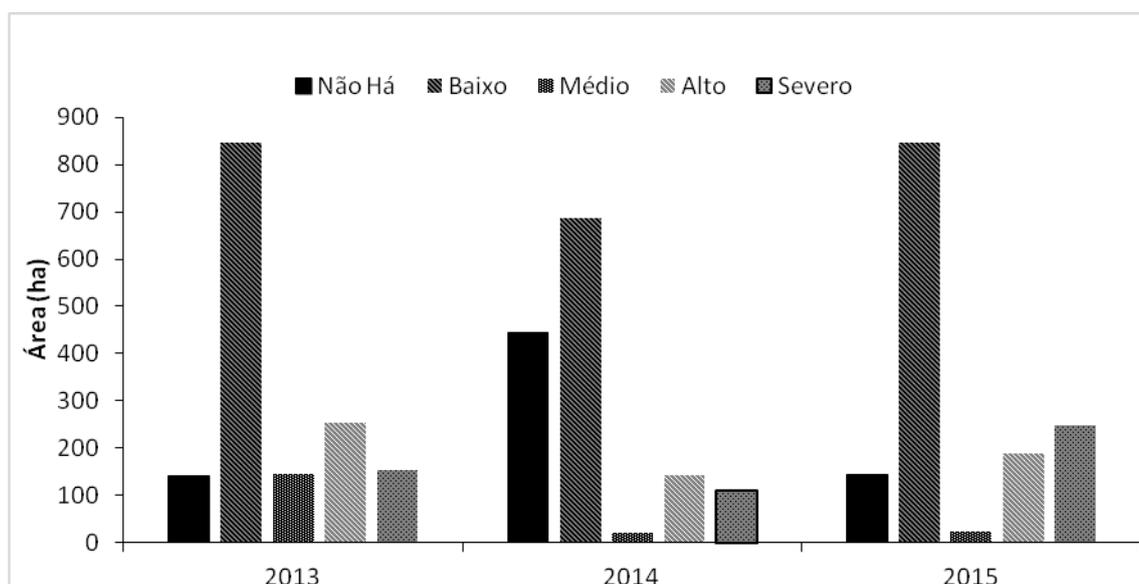


Figura 16. Estatísticas da área de degradação do município de Petrolina e adjacentes em 2013, 2014 e 2015.

Os resultados da avaliação da degradação nos anos de 2013 a 2015 são apresentados na Figura 17. Para a classe não há degradação foi atribuído uma tonalidade verde escuro, esta classe corresponde principalmente às áreas irrigadas. Os corpos

d'água foram classificados como não há degradação e este resultado foi comprovado através do NDVI que nos mesmos apresentaram valores negativos (Figura 14).

De acordo com os diferentes graus de degradação do município de Petrolina nos três anos estudados (Figura 17), constatou-se que a degradação apresentou uma tendência de inversão, embora alguns locais tiveram expansão da degradação. Este fato é observado na análise dos mapas de degradação dos meses de Agosto, Outubro, Novembro e Dezembro do ano de 2015 (Figura 17 G, H, I e J) em que de outubro a novembro houve aumento da degradação, principalmente para a classe severa, contudo, quando se analisa os meses citados anteriormente com o mês de dezembro observa-se a reversão da degradação, uma vez que, no mês de dezembro houve diminuição, principalmente, das classes Alta e severa e aumento das classes não há e baixa degradação. Wang et al. (2003), analisando a degradação da superfície no norte da China entre 1988 e 2000, utilizaram uma classificação similar a deste trabalho, encontrando assim resultados que corroboram com os que aqui foram apresentados.

Conforme a regra utilizada, as mudanças de NDVI e albedo tiveram relação linear com a mudança de grau de degradação, mostrando assim, que a reversão da degradação foi caracterizada pelo aumento do NDVI ou a diminuição do albedo (Figura 14 e 12). Este resultado condiz com os observados por Xu et al. (2009) que desenvolveram um método de avaliação da desertificação por meio de indicadores a partir de imagens orbitais que consideram o efeito de heterogeneidade ambiental nos valores determinados através do sistema por árvore de decisão.

Para a representação da classe de nível não há degradação a distribuição espacial desta classe é mostrada na Figura 17. O mapa de 02/06/2014 (Figura 17 D) apresentou na maior parte da área do Município baixa degradação. Esta classe, que abrange os valores baixos de níveis de risco à degradação do solo, tem os setores representativos ocupando 62,47% de área. Destas observações, infere-se que na data de imageamento, a área estudada oferece menor risco ao processo de degradação. Este fato deve-se a precipitação bem como a resiliência da caatinga que são fatores que influenciam na formação e manutenção da caatinga.

Observa-se na Figura 17 que a classe com tonalidade em vinho, corresponde a classe severa, esta que representa os pixels com os menores valores de NDVI e maiores

valores de albedo e MSDI, a mesma corresponde principalmente à área urbana, áreas de solo exposto e áreas salinizadas com alta suscetibilidade a desertificação.

Nota-se que a degradação está mais concentrada nas margens do rio São Francisco e áreas adjacentes, bem como próximo as áreas antropizadas, principalmente, no perímetro irrigado de Petrolina e Juazeiro, devido à supressão da caatinga e abandono das áreas irrigadas. Pelo percentual de degradação da classe severa, observa-se grande desgaste e um sério comprometimento das condições de sustentabilidade do solo. O fato da classe de degradação severa possuir os menores percentuais de área ocupada (1,88% - 22,62%) não pode ser ignorado, uma vez que é nesta classe que podem estar localizados os núcleos de desertificação (CANDIDO, BARBOSA e SILVA, 2002). Pôde-se constatar, ainda, na área de estudo que o mapa de degradação está em conformidade com os mapas de NDVI e SAVI (Figuras 14 e 15), em que há a falta de cobertura vegetal nas áreas que se encontram a classe severa, contribuindo, para uma maior susceptibilidade à erosão.

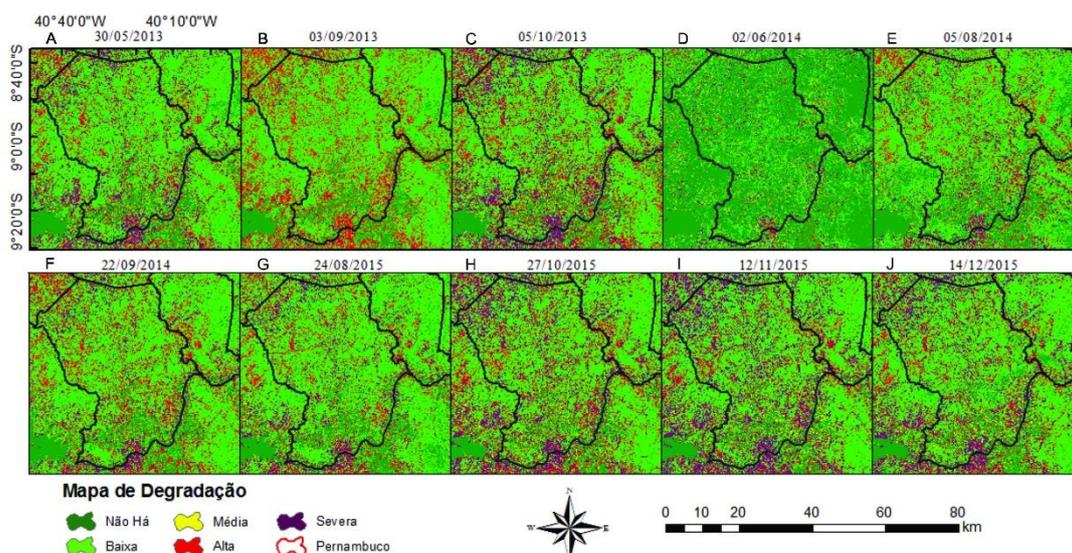


Figura 17. Mapa de degradação do município de Petrolina-PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

5.7 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

Na Figura 18 está representado o mapa temático da temperatura da superfície (T_s , °C) no município de Petrolina – PE, para os referentes dias de imageamento. A

emissividade encontrada teve poucas variações, sendo que, para quase todos os dias observados variou entre 0,97 e 0,98.

Na Figura 18 os menores valores de temperatura são representados pelos corpos hídricos da área em estudo, estes são representados pelas tonalidades mais claras na faixa do branco ao azul. Conforme, pode-se observar, para as imagens do ano de 2013 os corpos hídricos apresentaram tonalidade azul (Figura 18 ABC), mostrando-se de modo geral concentrar os menores valores de temperaturas. Souza et al. (2016) encontraram os menores valores de temperatura da superfície na água e na vegetação densa em todas as cenas analisadas entre os anos de 1991 e 2010.

As maiores temperaturas atingiram 44,9°C, sendo representadas pelos tons variando de vermelho claro para um vermelho mais intenso. As maiores temperaturas são encontradas principalmente nas áreas caracterizadas por solo exposto ou vegetação de caatinga rala, este fato ocorre para os três anos estudados. Souza et al. (2016) encontraram, valores de temperatura para solo exposto (31°C) e vegetação rala (30°C), corroborando assim com os resultados deste trabalho.

A Figura 18 apresenta a distribuição temporal e espacial da temperatura, constatou-se que a imagem de 05/10/2013 apresentou os menores valores de temperatura representada pela tonalidade branca, apesar de ser considerado ano seco, este fato pode ser explicado primeiro pelas condições atmosféricas antes do imageamento como presença de muitas nuvens que reduz a entrada de radiação solar direta reduzindo a absorção o aquecimento da superfície, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar. Foi observado para as variáveis meteorológicas no dia do imageamento os seguintes valores: temperatura do ar (23,73 °C), umidade relativa (63,25%), logo, as variáveis meteorológicas contribuíram para a diminuição da temperatura da superfície.

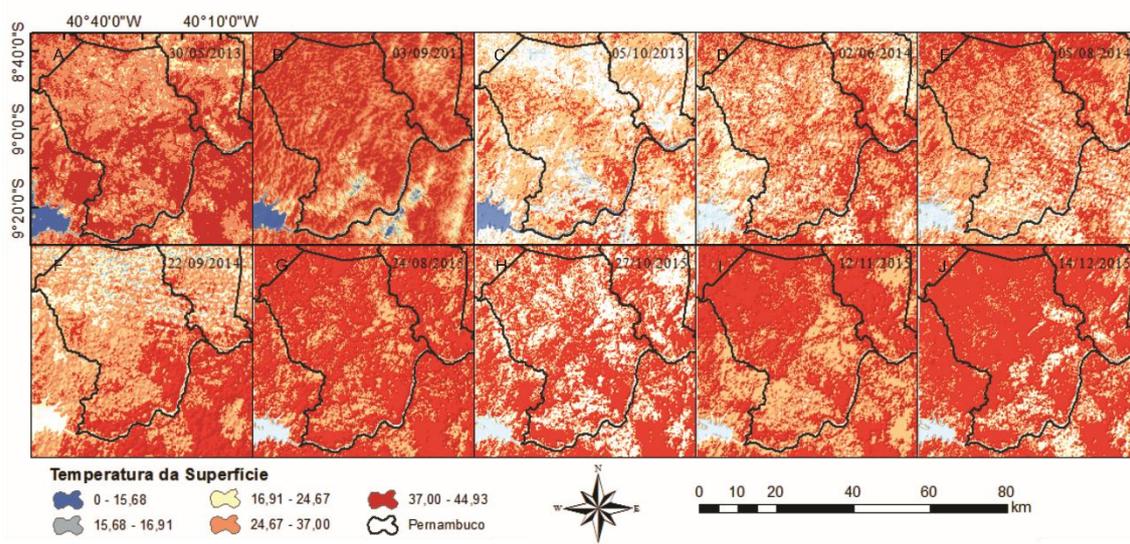


Figura 18. Mapa temático da temperatura da superfície (T_s , °C) no Município de Petrolina-PE para as datas: 30/05/2013 (A), 03/09/2013 (B), 05/10/2013 (C), 02/06/2014 (D), 05/08/2014 (E), 22/09/2014 (F), 24/08/2015 (G), 27/10/2015 (H), 12/11/2015 (I) e 14/12/2015 (J).

5.8 MAGNITUDE DA MUDANÇA

Os resultados da avaliação da magnitude da mudança nos anos de 2013 a 2015 são apresentados na Figura 19. Para a classe não houve mudança foi atribuído uma tonalidade branca, a classe mudança severa foi representada pela tonalidade vermelha. Os corpos d'água foram classificados em sua grande maioria como não houve mudança.

Observa-se que o imageamento das imagens do ano de 2013 (Figura 19 A, B e C), em comparação aos demais anos, apresentou maior áreas classificadas como mudança severa (tonalidade vermelha). Pode-se observar que entre o mês anterior “setembro” e o mês posterior “outubro” a precipitação pluviométrica foi de apenas 4,6 mm (Tabela 7) valor considerado baixo para dois meses. Zhana et al. (2000), também relacionaram a precipitação como o principal fator na presença das classes de mudanças mais severas nas áreas estudadas.

Comparando os resultados, especificamente a Figura 19 D, E e F, é possível notar que há uma grande similaridade entre estas imagens obtidas no ano de 2014. Este comportamento é explicado, em parte, pelo fato de que período de 2014 apresentou um maior regime de chuva quando comparado a 2013 e 2015, uma vez que a caatinga apresenta um grande poder de resiliência sua resposta à precipitação ocorre de forma rápida, com isto, no período entre as imagens comparadas do mês anterior “junho” e

posterior “agosto” choveu 30 mm, sendo suficiente para ocorrer a regeneração da caatinga no município de Petrolina.

Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Zhana et al. (2000), que estudaram a detecção de mudança da cobertura terrestre com o algoritmo magnitude da mudança. Zhana et al. (2002), estudando e detectando áreas queimadas, inundadas e desmatadas usando os dados MODIS, encontraram resultados satisfatórios que corroboram com os encontrados neste trabalho.

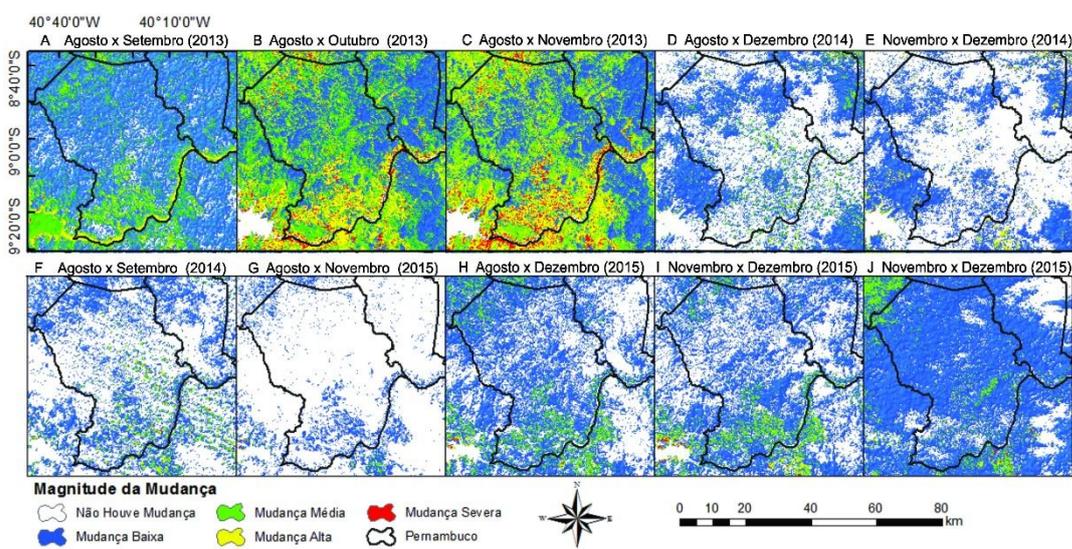


Figura 19. Mapa temático da Magnitude da mudança do município de Petrolina-PE.

5.9 DETECÇÃO DE MUDANÇAS

As mudanças ocorridas entre 2013 e 2015 observadas nas imagens de detecção, geradas a partir das imagens de NDVI são apresentadas nas Figuras 20. A imagem detecção permitiu ressaltar as áreas com redução da cobertura da caatinga em decorrência da mudança no uso da terra nos anos analisados.

A classe Não Houve Mudança foi atribuída uma tonalidade branca, a classe Mudança Severa foi representada pela tonalidade vermelha. Os corpos d’água foram classificados em sua grande maioria como mudança severa, quando comparado os mapas de magnitude de mudança e detecção de mudanças observa-se que o algoritmo da técnica de detecção de mudanças foi mais sensível aos corpos hídricos do que o algoritmo da técnica magnitude da mudança, uma vez que nos mapas de detecção de mudanças os corpos hídricos de quase todos os meses analisados foram classificados

como mudança severa (Figura 20). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Ribeiro et al. (2014) que estimaram e detectaram mudanças na vegetação de caatinga através de geotecnologias no município de Sumé-PB.

Nas imagens classificadas do ano de 2014 (Figura 20 CD e E), é possível visualizar que quando comparado os meses de junho, agosto e setembro, houve pouca mudança, sendo que a classe não houve (tonalidade branca) mudança se destacou entre as demais classes. A cobertura vegetal na estação chuvosa, no mês de junho de 2014, em comparação com o mês e setembro de 2014, não apresentou uma diferença entre esses meses o suficiente para modificar completamente toda a paisagem. No entanto, esses valores devem ser observados com ressalva, pois foram observados a presença de nuvens em algumas imagens.

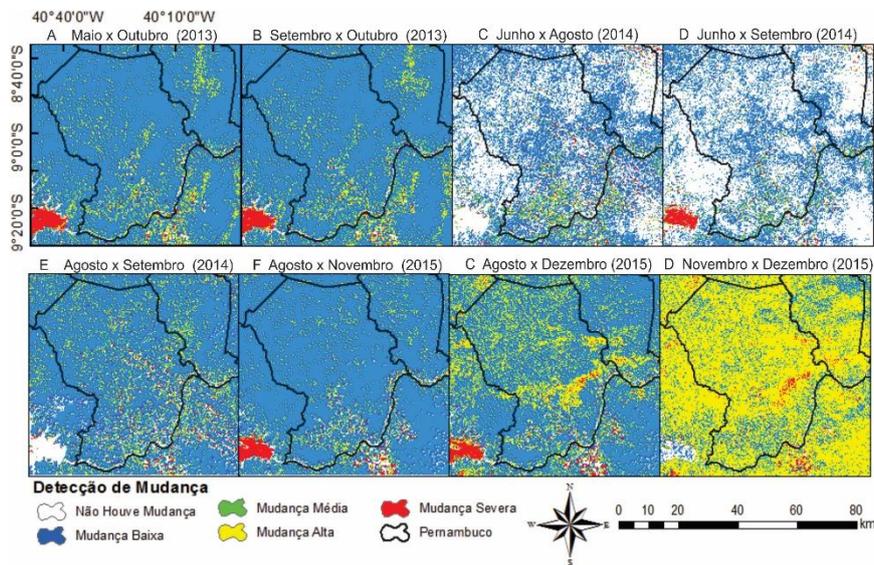


Figura 20. Mapa temático da detecção de mudança do município de Petrolina-PE.

6. CONCLUSÃO

As alterações do uso e ocupação do solo foram identificadas com o aumento do albedo e da temperatura da superfície e, diante da redução dos índices de vegetação. O albedo encontrado corroborou com a literatura observada, foram mais expressivos sobre solo exposto e inferiores nos corpos hídricos. O albedo confirmou, diante do seu monitoramento, ser importante na interpretação dos estudos de alterações ambientais no semiárido, causadas principalmente por ações antrópicas.

Os índices de vegetação identificaram satisfatoriamente o comportamento da vegetação no Município de Petrolina – PE, destacando-se como indicadores de áreas em processo de degradação no semiárido. Observou grande relação com o albedo, que diante dos seus menores valores, contudo os índices foram, de modo geral, mais expressivos, indicando mais claramente alterações sobre uso da terra na região.

Os métodos de magnitude da mudança, detecção de mudanças e mostraram ser mais eficientes no monitoramento da degradação ambiental e de mudanças da superfície, durante os três anos estudados, apresentando valores elevados de índice Kappa e acurácia.

A precipitação acumulada inferiu mais no albedo e na temperatura da superfície. Sendo que, chuvas acumuladas em dois e em 45 dias antes da passagem do satélite Landsat-8 correlacionou-se muito bem com os parâmetros biofísicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L.; PACHÊCO, A.; THOMAZ, C.; COSTA, C.; LOPES, O. F.; OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000300019>.

ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERNSTEIN, L. S.; LEVINE, R. Y.; BERK, A.; RICHTSMEIER, S. C.; ACHARYA, P. K.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G. W.; GARDNER, J. A.; HOKE, M. L.; JEONG, L. S.; PUKALL, B.; RATKOWSKI, A.; BURKE, H. H. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN. *Imaging Spectrometry, Proceedings*. n. 9, v. 61. 1999. <http://dx.doi.org/10.1117/12.366315>.

ANDERSON, G.P.; PUKALL, B.; ALLRED, C.L.; JEONG, L.S.; HOKE, M.; CHETWYND, J.H.; ADLER-GOLDEN, S.M.; BERK, A.; BERNSTEIN, L.S.; RICHTSMEIER, S.C.; ACHARYA, P.K.; MATTHEW, M.W. FLAASH and MODTRAN4: state-of-the-art atmospheric correction for hyperspectral data. *Aerospace Conference, IEEE*. v. 4, p. 177-181, 1999.

ALLEN, R.; Waters, R.; Bastiaanssen, W.; Tasumi, M.; Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). *Advanced training and user's manual, Idaho Implementation*, v. 1.0, p. 97, 2002.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. New York, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. Análise a variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na bacia hidrográfica do alto curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, Brasil. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 35 n. 3, p. 530-553, 2015.

ANJOS, R. S.; CANDEIAS, A. L. B.; NÓBREGA, R. S. Caracterização das chuvas através do satélite TRMM em Petrolândia-PE. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.18, p. 307-326, JAN/JUN. 2016.

ANJOS, R. S.; NÓBREGA, R. S. Validando os dados de estimativa de precipitação por sensoriamento remoto do satélite TRMM para Pernambuco – Brasil. Ciências da Terra e do Espaço, Évora, Portugal, p. 129-136, 2013.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; SILVA, B. B. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. Revista Caatinga, v.25, n.1, p.119-127, 2012.

Árvores de Decisão. Disponível em: < <http://web.tecnico.ulisboa.pt/ana.freitas/bioinformatics.ath.cx/bioinformatics.ath.cx/indexf23d.html?id>>. Acessado em 15 de Maio de 2016.

BARRERA, D. F. Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against raingage observations. Foz do Iguaçu, 2005.

BASTIAANSSEN, W.G.M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. Netherlands: CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag. Tese de Doutorado. 1995, 272p.

BATISTA, J. L. O.; SANTOS, R. L. Detecção de mudança (change detection) da cobertura e uso do solo em região semiárida: enfoque para o Município de Teofilândia-Ba. Revista de Geografia (UFPE). v. 30, n. 1, 2013.

BECERRA, B.; ALVALÁ, J.A.; R.C.S.; RANDOW, R. C. Seasonal Variability of Vegetation and Its Relationship to Rainfall and Fire in the Brazilian Tropical Savanna. In: Boris Escalante-Ramirez. (Org.). Remote Sensing - Applications. Intech, v. 1, p. 77-98, 2012.

BEZERRA, J. M. Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife – PE, 2013.

BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB. v. 15, n. 7, p. 709-717, 2011.

BIAZETO, B. Impacto da precipitação no ciclo de assimilação em modelos de mesoescala. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo (SP). 118 p. 2007.

BODILY, S. Modern Decision Making. McGraw Hill, 1985.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. *Remote Sensing of Environment*, v. 79, n. 2, p. 329-343, 2002.

BOVOLO, F.; BRUZZONE, L. A detail-preserving scale-driven approach to change detection in multitemporal SAR images. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v. 43, n. 12, p. 2963-2972, 2005.

CAATINGA – Localização. Disponível em: <<http://ambientes.ambientebrasil.com.br/natural/biomas/caatinga-localizacao.html>>. Acessado em 16 de Maio de 2016.

CANDIDO, H. G.; BARBOSA, M. P.; SILVA, M. J. Avaliação da degradação ambiental de parte do Seridó Paraibano *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 6 n. 2 Campina Grande. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000200031>.

COLLISCHONN, B. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS). 128 p. 2006.

COOLEY, T.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G. W.; HOKE, M. L.; RATKOWSKI, A. J.; CHETWYND, J. H.; GARDNER, J. A.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ACHARYA, P. K.; MILLER, D.; LEWIS, P. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International (IGARSS)*, 2002, Toronto. Proceedings. 2002. p. 141.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.539-548, 2012.

DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.385-392, 2008.

DICKINSON, R. E., e HENDERSON-SELLERS, A. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, p. 439– 462, 1988.

DRUMOND, M. A.; SCHISTEK, H.; SEIFFARTH, J. A.; ABRAMOVAY, C. B. R.; OVERBECK, G. Caatinga: um bioma exclusivamente brasileiro e o mais frágil. *Revista do Instituto Humanitas Unisinos*. Nº 389, 2012.

DUANYANG X.; XIANGWU K.; DONGSHENG Q.; DAFAN Z. JIANJUN P. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale – A case Study in the Ordos Plateau, China. *Sensors*, 2009.

FLORENZANO, T.G. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. Oficina de textos. p.97, 2002.

GÓMEZ, C.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A. Characterizing the state and processes of change in a dynamic forest environment using hierarchical spatio-temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment*, v.115, p.1665-1679, 2011.

GONÇALVES, L. S. *Relações Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativas de precipitação por satélite*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS. 135f. Disponível em:<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/49152/000829742.pdf?sequence=1> > Acesso em: 09 Março 2016.

HAYES, D. J.; SADER, S. A. Change detection techniques for monitoring forest clearing and regrowth in a tropical moist forest. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Falls Church, v. 67, n. 9, p. 1067-1075, 2001.

HUANG, C.; TOWNSHEND, J. R. G.; ZHAN, X.; HANSEN, M.; DEFRIES, R.; SOHLBERG, R. Developing the spectral trajectories of major land cover change processes. *SPIE*, V. 3502, 1998. <http://dx.doi.org/10.1117/12.317807>.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v. 4, n. 4, p.367-376, 1988.

HUETE, A. R.; WARRICK, A. R. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 32, n. 2, p. 155-167, 1990.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico de 2014. Disponível em: < <http://cod.ibge.gov.br/23BAX>>. Acessado em 06 de Maio de 2016.

JAFARI R. Arid Land Condition Assessment and Monitoring Using Multispectral and Hyperspectral Imagery PhD thesis The University of Adelaide Australia, 2007.

JIA, S.; ZHU, W.; LU A.; YAN T. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote Sensing of Environment*, pag. 3069-3079 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.009> >Acesso em: 09 Mar. 2016.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in orbit. *Journal of Applied Meteorology*. V. 39, n. 12: 1965-1982. 2000. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)0402.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)0402.0.CO;2).

M A C H A D O, C. C.; S I L V A, B. B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVINCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, n. 1, p. 55-67, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862014000100006>.

MAFFRA, C. Q. T. Modelagem da umidade do solo a partir de dados multiespectrais dos sistemas Landsat, ASTER e MODIS. *Boletim de Ciências Geodésicas, Resumos*. Curitiba, v. 11, n. 1, p. 151 -153, 2005.

MITCHELL, T. O. M.; LEARNING, M.; HILL, M. *Aprendizado de máquina: árvore de decisão indutiva*, 1997.

NASA. NASA Facts: TRMM Instruments. Disponível em: http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/ceres.html. Acesso em julho de 2015.

NASA. TRMM 3B42_V7. Disponível em:< http://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM_3B42_V7.shtml>. Acesso em março de 2017.

NICÁCIO, R. M.; ROTUNNO FILHO, O. T.; OLIVEIRA, L. M T.; FRANÇA, G. B. Avaliação espaço-temporal integrada do ndvi com o regime pluviométrico na bacia do Rio São Francisco. GEOGRAFIA, v. 34, p. 667-680, 2009.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climate, v. 4, n. 10, 1991.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P.; GALVÍNCIO, J. D. Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma Sub-Bacia da Amazônia. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 25, n. 1, jan/abr. 2008.

NOVAES, R. L. M.; FELIX, S. Save Caatinga from drought disaster. Nature. v. 498, n. 7453, p. 170. 2013, <http://dx.doi.org/10.1038/498170a>.

O'BRIEN, K. L. Tropical deforestation and climate change. Progress in Physical Geography, v. 20, n. 3, p. 311 – 332, 1996.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; GOIS, G.; LANNES, A.; DIAS, F. O.; SOUZA, J. C.; SOUZA, M. Análise da Precipitação e sua Relação com Sistemas Meteorológicos em Seropédica, Rio de Janeiro, Floresta e Ambiente. v. 21, n. 2, 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2014.030>.

PRATES, I.; ALVARENGA, A. S.; MORAES, M. S. Utilização de imagens LANDSAT-8 para caracterização da cobertura vegetal. 2014.

QUARTAROLI, C. F.; BATISTELLA, M. Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: Tutorial Básico. Documentos 44. 2005.

RIBEIRO, G., N. FRANCISCO, P., R., M. MORAES, J., M. Detecção de mudança de vegetação de caatinga através de geotecnologias. Revista Verde. V. 9, n. 5, p. 84 - 94, 2014.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium, Proceedings. Washington, 1973, v.1, p. 309-317. 1973.

RUHOFF, A. L.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do albedo e balanço de energia a partir de imagens LANDSAT-8 OLI. INPE. 2015.

SANTOS, J. S., LINGNAU, C. Monitoramento em área de catástrofe ambiental através de técnica de detecção de mudanças. *Cerne*. V. 19, n. 1. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000100016>.

SELLERS, P. J.; BOUNOUA, L.; COLLATZ, G. J.; RANDALL, D. A.; DAZLICH, D. A.; LOS, S. O.; BERRY, J. A.; FUNG, I.; TUCKER, C. J.; FIELD, C. B.; JENSEN, T. G. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 271, p. 1402–1406. 1996.

SHERWOOD, S.; FU, Q. A drier future? *Science*, v. 343, n. 6172, p. 737-739. PMID:24531959. 2014. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1247620>.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga*, v. 24, n. 3, p.145-152, 2011.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, p. 201-211, 2005.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat-5 TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 201-211. 2005b.

Silva, F. H. B. B.; Silva, M. C., L.; Cavalcanti, A. C.; Cunha, T. J. F. Principais solos do semiárido do nordeste do Brasil. 2005a.

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T. Áreas e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade na Caatinga. 2004.

SOUZA, J. F. Análise das mudanças do uso e ocupação do solo, variabilidade da temperatura e do saldo de radiação em João Pessoa – PB. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, 2014

SOUZA, J. F.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa – PB. *Ambiente Construído*, v.16, n.1, p.21-37, 2016.

TANSER, F.C.; PALMER, A.R. The application of a remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in a semi-arid, heterogeneous, South African landscape. *J. Arid. Environ.* v. 43, 477-484. 1999.

- TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O.; LI, W.; GURNEY, C.; MCMANUS, J. Global land cover classification by remote sensing: present capacities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 243– 256. 1991.
- TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O.; SKOLE, D.; MALINGREAU, J. P.; CIHLAR, J.; TEILLET, P.; SADOWSKI, F.; RUTTENBERG, S. The 1 km AVHRR global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, n. 17, p. 3417– 3441. 1994.
- USGS (United States Geological Survey). Landsat-8 Pre-WRS-2 Data Products. 2015. Disponível em: < <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>. Acessado em 10 de Maio de 2016.
- VASCONCELOS, R. S. Correção atmosférica de imagens landsat 5-tm utilizando código 6s. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife – PE, 2015.
- WANG, T.; WU, W.; XUE, X.; SUN, Q.; CHEN, Q. Study of spatial distribution of sandy desertification in North China in recent 10 years. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.* (2004). doi:10.1360/04zd0009.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v.90, p. 8995-9005. 1985.
- XU, D.; KANG, X.; QIU, D.; ZHUANG, D.; PAN, J. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale: A Case Study in the Ordos Plateau, China. *Sensors*, v. 9, n. 3, p. 1738–1753, 2009. Disponível em: Acesso em:17/03/2011.
- XUE, Y. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian Grassland on the regional climate. *Journal of Climate*, v. 9, p. 2173– 2189. 1996.
- ZHAN, X.; DEFRIES, R., TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; HANSEN, M.; HUANG, C.; SOHLBERG, R. The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA’s Earth Observing System. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6 and 7), p. 1433–1460, 2000.

ZHAN, X.; HUANG, C.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; HANSEN, M.; DIMICELI, C.; SOHLBERG, R.; HEWSON-SCARDELLETTI, J.; TOMPKINS, A. Land cover change detection with change vector in the red and near-infrared reflectance space. IGARSS'98: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Seattle, Washington, vol. II. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Geoscience and Remote Sensing Society, New York. p. 859–861, 1998.

ZHAN, X.; DEFRIES, R.; TOWNSHEND J. R; G.DIMICELI, C.; HANSEN, M.; HUANG, C.; SOHLBERG, R. The 250m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System. *int. j. remote sensing*, v. 21, n. 6, p. 1433–1460. 2000.

ZHAN, X.; HUANG, C.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; HANSEN, M.; DIMICELI, C.; SOHLBERG, R.; HEWSON-SCARDELLETTI, J.; TOMPKINS, A. Land cover change detection with change vector in the red and near-infrared reflectance space. *Proceedings of the 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98*, Seattle, Washington, v. 2, p. 859–861. 1998.

8. Anexos

Tabela 15. Precipitação acumulada antecedentes a passagem do satélite.

Data	Estação	Dias									
		2	8	16	30	45	60	75	90	115	120
28/01/2015	Petrolina INMET	0,4	11,6	12,0	12,0	50,1	59,9	147,4	151,3	151,3	151,3
	Lagoa grande	0,0	7,0	7,0	27,0	50,0	50,0	101,0	101,0	101,0	101,0
	Petrolina UNIVASF	0,0	9,1	9,1	9,1	78,9	88,6	188,7	190,5	190,5	190,5
	Juazeiro (Mandacaru)	0,0	0,0	11,5	57,5	67,5	167,0	167,0	167,0	172,2	172,2
	UNIVASF	0,0	18,3	18,3	18,3	29,0	51,8	168,7	168,7	168,7	168,7
05/08/2014	Petrolina INMET	0,0	23,1	25,7	26,3	26,3	27,6	27,6	27,6	48,2	209,0
	Lagoa grande	0,0	5,0	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	51,7	51,7
	Petrolina UNIVASF	0,0	26,2	29,0	29,2	29,5	29,5	29,5	29,5	77,5	91,7
	Juazeiro (Mandacaru)	0,0	17,7	18,2	18,9	18,9	19,9	19,9	21,5	34,3	106,1
	UNIVASF	0,0	12,4	12,4	12,4	12,4	13,2	13,2	13,2	38,1	84,1
02/06/2014	Petrolina INMET	0,0	0,0	0,0	1,0	16,2	181,4	184,5	200,9	274,0	275,6
	Lagoa grande	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	40,0	40,0	40,0	118,0	118,0
	Petrolina UNIVASF	0,0	0,0	0,0	0,5	46,7	151,4	151,4	160,5	191,7	191,7
	Juazeiro (Mandacaru)	0,0	0,0	1,2	2,2	14,4	182,6	182,6	183,7	259,2	259,2
	UNIVASF	0,0	0,0	0,0	0,3	24,9	144,5	151,1	153,7	230,1	230,1
30/05/2013	Petrolina INMET	0,0	0,0	1,0	1,8	34,0	35,6	90,4	90,4	90,4	90,4
	Lagoa grande	0,0	11,5	13,5	16,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
	Petrolina UNIVASF	0,0	0,0	0,3	3,3	4,1	56,1	56,6	72,1	72,4	72,4
	Juazeiro (Mandacaru)	0,0	0,0	0,0	3,8	7,3	7,3	52,1	52,1	52,1	52,1
	UNIVASF	0,0	0,3	0,3	1,0	14,0	14,0	48,0	48,0	48,0	48,0

Tabela 16. Precipitação acumulada estimada pelo satélite TRMM.

Data	Dias									
	2	8	16	30	45	60	75	90	105	120
28/01/2015	3,057	29	31,56	109	165,9	186,3	186,3	186,3	186,3	186,3
	3,057	29	31,56	109	165,9	186,3	186,3	186,3	186,3	186,3
	3,057	29	31,56	109	165,9	186,3	186,3	186,3	186,3	186,3
	3,057	29	31,56	109	165,9	186,3	186,3	186,3	186,3	186,3
	3,057	29	31,56	109	165,9	186,3	186,3	186,3	186,3	186,3
05/08/2014	3,08	10,87	15,85	60,98	47,78	95,18	95,18	95,18	97,2	97,2
	3,08	10,87	15,85	60,98	47,78	95,18	95,18	95,18	97,2	97,2
	3,08	10,88	15,85	27,19	47,78	95,18	95,18	95,18	97,2	97,2
	3,08	10,87	15,85	60,98	47,78	95,18	95,18	95,18	97,2	97,2
	3,08	10,87	15,85	33,97	47,78	95,18	95,18	95,18	97,2	97,2
02/06/2014	6,8	22,28	36,01	89,6	106,96	353	353	353	362,1	363,5
	6,8	22,28	36,01	89,6	106,96	353	353	353	362,1	363,5
	6,8	22,28	36,01	89,6	106,96	353	353	353	362,1	363,5
	6,8	22,28	36,01	89,6	106,96	353	353	353	362,1	363,5
	6,8	22,28	36,01	89,6	106,96	353	353	353	362,1	363,5
30/05/2013	1,12	14,63	28,72	41,87	68,14	79,82	106,04	106,04	106,04	106,04
	1,12	14,63	28,72	41,87	68,14	79,82	106,04	106,04	106,04	106,04
	1,12	14,63	28,72	41,87	68,14	79,82	106,04	106,04	106,04	106,04
	1,12	14,63	28,72	41,87	68,14	79,82	106,04	106,04	106,04	106,04
	1,12	14,63	28,72	41,87	68,14	79,82	106,04	106,04	106,04	106,04