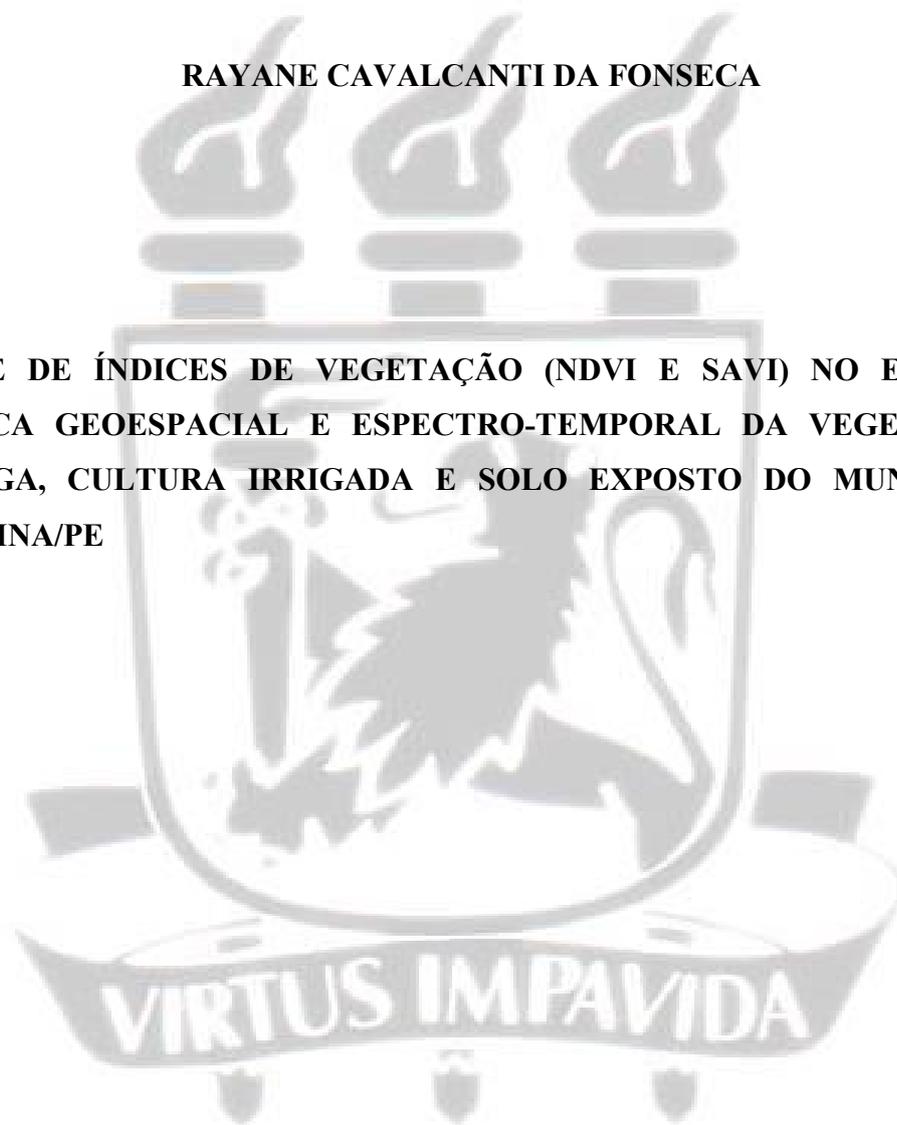

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA

RAYANE CAVALCANTI DA FONSECA

**ANÁLISE DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI E SAVI) NO ESTUDO DA
DINÂMICA GEOESPACIAL E ESPECTRO-TEMPORAL DA VEGETAÇÃO DE
CAATINGA, CULTURA IRRIGADA E SOLO EXPOSTO DO MUNICÍPIO DE
PETROLINA/PE**



Recife
2017

RAYANE CAVALCANTI DA FONSECA

**ANÁLISE DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI E SAVI) NO ESTUDO DA
DINÂMICA GEOESPACIAL E ESPECTRO-TEMPORAL DA VEGETAÇÃO DE
CAATINGA, CULTURA IRRIGADA E SOLO EXPOSTO DO MUNICÍPIO DE
PETROLINA/PE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica.

Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F676a	<p>Fonseca, Rayane Cavalcanti da. Análise de índices de vegetação (NDVI e SAVI) no estudo da dinâmica geoespacial e espectro-temporal da vegetação de caatinga, cultura irrigada e solo exposto do município de Petrolina/PE / Rayane Cavalcanti da Fonseca. – 2017. 77 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, 2017. Inclui Referências e Apêndice.</p> <p>1. Engenharia Cartográfica. 2. Índices de vegetação. 3. Sensoriamento remoto. 4. Caatinga. 5. Cultura irrigada. I. Pacheco, Admilson da Penha. (Orientador). II. Título.</p>
	UFPE
526.1 CDD (22. ed.)	BCTG/2017-407

RAYANE CAVALCANTI DA FONSECA

Análise de índices de vegetação (NDVI e SAVI) no estudo da dinâmica geoespacial e espectro-temporal da vegetação de Caatinga, cultura irrigada e solo exposto do município de Petrolina/PE

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Engenharia Cartográfica e Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para obtenção do grau de Engenheira Cartógrafa.

Aprovado em: 05/12/2017

Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco (Orientador acadêmico)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Neison Cabral Ferreira Freire (Examinador externo)
Fundação Joaquim Nabuco

Prof. Msc. Erison Rosa de Oliveira Barros (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela presença em todos os momentos da minha vida e por me dar forças para enfrentar as adversidades, e sabedoria para aproveitar as oportunidades.

À minha mãe, que apesar de ter sido pai e mãe e que soube conduzir este papel de maneira digna, fornecendo todo seu apoio nas escolhas feitas ao longo da vida.

Aos meus tios e tias, pelo suporte fornecido durante a vida. Em especial a minha tia Roseli Cavalcanti da Silva, a qual sou grata por todo o apoio e incentivo ao longo da fase acadêmica e no crescimento pessoal.

Aos demais membros da minha família, que mesmo na dificuldade se fizeram presentes e unidos.

Ao meu orientador, professor Admilson da Penha Pacheco, pela oportunidade em trabalhar nesta pesquisa, pelo incentivo à procura por novos lugares a serem explorados para a continuação da fase acadêmica e por ter me apresentado a Fundação Joaquim Nabuco.

Ao professor Neison Cabral Ferreira Freire, por toda atenção e compreensão durante a fase de elaboração deste trabalho, por acreditar no meu potencial e sempre me orientar nos caminhos a serem escolhidos, e pela contribuição no meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos, que se fizeram presentes desde a infância e ainda me acompanham nessa jornada, com toda compreensão e paciência. Aos mais recentes, do Centro Integrado de Estudos Georreferenciados para a Pesquisa Social (CIEG), por todo o apoio durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Petrolina é um município inserido na região semiárida do Estado de Pernambuco, caracterizada por apresentar vegetação de bioma Caatinga e por ser encontrada na região fisiográfica do submédio do rio São Francisco. Percebe-se nesta área a presença de atividades antrópicas como agricultura, produção agrícola, pastagens e outros agentes que vêm contribuindo para a modificação deste município. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade analisar e mapear a dinâmica espectro-temporal da cobertura vegetal no município de Petrolina e suas possíveis relações com as mudanças em decorrência do processo agrícola existente na região, no período de 2003, 2011 e 2016. Este processo será realizado por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto, direcionadas para o estudo da vegetação. Foram aplicados os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), cujos valores variam no intervalo de -1 a 1, nas imagens de satélite LandSAT 5, sensor TM e LandSAT 8, sensor OLI. Utilizou-se o *software* SPRING para a criação do banco de dados geográfico e nele foi elaborada uma programação em linguagem LEGAL, com a finalidade de corrigir as influências atmosféricas e outros parâmetros. Para fins de comparação, foram classificadas em quatro classes denominadas por: água/sombra de nuvem, solo e/ou afloramento rochoso, fisionomia Caatinga e agricultura irrigada. Os resultados fornecidos por estes índices (NDVI e SAVI), indicaram diferenças entre as classes, com destaque para a fisionomia Caatinga. Foi observada uma maior presença de vegetação Caatinga nas imagens geradas pelo NDVI em comparação com o SAVI. Esses resultados apontam a necessidade de estudos mais aprofundados na escolha dos índices a serem aplicados e que melhor se adequem às condições da região de estudo.

Palavras-chave: Índices de vegetação. Sensoriamento remoto. Caatinga. Cultura irrigada.

ABSTRACT

Petrolina é um município inserido na região semiárida do Estado de Pernambuco, caracterizada por apresentar vegetação de bioma Caatinga e por ser encontrada na região fisiográfica do submédio do rio São Francisco. Percebe-se nesta área a presença de atividades antrópicas como agricultura, produção agrícola, pastagens e outros agentes que vem contribuindo para a modificação deste município. Nesse contexto, o presente trabalho tem como finalidade analisar e mapear a dinâmica espectro-temporal da cobertura vegetal no município de Petrolina, e suas possíveis relações com as mudanças em decorrência do processo agrícola existente na região, no período de 2003, 2011 e 2016. Este processo será realizado por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto, direcionadas para o estudo da vegetação. Foram aplicados os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), cujos valores variam no intervalo de -1 a 1, nas imagens de satélite LandsAT 5, sensor TM e LandsAT 8, sensor OLI. Utilizou-se o *software* SPRING para a criação do banco de dados geográfico e nele foi elaborada uma programação em linguagem LEGAL, com a finalidade de corrigir as influências atmosféricas e outros parâmetros. Para fins de comparação, foram classificadas em quatro classes denominadas por: água/sombra de nuvem, solo e/ou afloramento rochoso, fisionomia Caatinga e agricultura irrigada. Os resultados fornecidos por estes índices (NDVI e SAVI), indicaram diferenças entre as classes, com destaque para a fisionomia Caatinga. Foi observada uma maior presença de vegetação Caatinga nas imagens geradas pelo NDVI em comparação com o SAVI. Esses resultados apontam a necessidade de estudos mais aprofundados na escolha dos índices a serem aplicados, e que melhor se adequem às condições da região de estudo.

Keywords: Vegetation indexes. Remote sensing. Caatinga. Irrigated culture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa do bioma Caatinga demonstrando a localização dos estados e sua relação com os demais biomas.....	16
Figura 2 – <i>Pilosocereus gounellei</i> e espécie de <i>Bromeliaceae</i> (<i>Encholirium spectabile martius</i>).....	18
Figura 3 – Fatores que influenciam nas estruturas na resposta espectral dos dosséis.....	20
Quadro 1 – Comparação dos resultados de NDVI e RATIO para as diferentes classes de alvos.....	23
Quadro 2 – Índices de vegetação aplicados para efeitos de correção atmosférica.....	27
Quadro 3 – Descrição dos Índices de Vegetação NDSVI e LSWI.....	29
Figura 4 – Mapa de localização do município de Petrolina-PE.....	32
Figura 5 – Mapa Geológico de Petrolina- PE.....	33
Figura 6 – Polos de irrigação e suas principais relações entre a área irrigada e a área total da micro bacia (%)......	35
Figura 7 – Caracterização das zonas de implantação das áreas irrigadas, sequeiro e ribeirinha.....	36
Gráfico 1 – Cultura irrigada do município de Petrolina para o ano de 2015.....	37
Figura 8 – Áreas destinadas ao cultivo da mangueira e videira (uva), respectivamente.....	37
Gráfico 2 – Dados pluviométricos comparativos de chuvas acumuladas para o ano de 2003, 2011 e 2016.....	39
Figura 9 – Fluxograma desenvolvido para a metodologia do trabalho.....	41
Quadro 4 - Coeficientes de calibração para as respectivas bandas espectrais do satélite LandSAT 5.....	42
Figura 10 – Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2003.....	44
Figura 11 – Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2011.....	44
Figura 12 – Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2016.....	46
Figura 13 – Fluxograma para determinação dos procedimentos de cálculo do NDVI.....	46
Figura 14 – Programação desenvolvida em ambiente Legal para o cálculo do SAVI correspondente aos anos de 2003, 2011 e 2016, respectivamente.....	47

Figura 15 – Fluxograma para determinação do cálculo do SAVI.....	47
Figura 16 – Fluxograma do procedimento de perda de vegetação.....	49
Figura 17 – Fluxograma dos métodos adotados para a criação do mapa temático representando a variação temporal do município (verde) e as perdas ocorridas durante os anos (vermelho).....	50
Figura 18 – Mapa temático do Índice NDVI do município de Petrolina para os anos de 2003(A) e 2011 (B).....	52
Figura 19 – Mapa temático do Índice NDVI do município de Petrolina para o ano de 2016 (C).....	52
Figura 20 – Perda de vegetação identificada para entre os anos de 2003-2011(A) e 2011-2016(B).....	54
Figura 21 –Mapa temático do Índice SAVI do município de Petrolina para os anos de 2003(A) e 2011(B).....	56
Figura 22 – Mapa temático do índice SAVI do município de Petrolina para o ano de 2016(C).....	56
Gráfico 3 – Comparação entre as medidas de classe (km ²) dos resultados do índice NDVI e SAVI	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Precipitação (mm) diária nos períodos antes da obtenção das imagens.....	39
Tabela 2 – Coeficientes de calibração utilizados para os anos de 2003 e 2011.....	42
Tabela 3 – Valores utilizados para determinar o ângulo zenital no momento da aquisição (Z).....	43
Tabela 4 – Parâmetros para o cálculo do TOA.....	45
Tabela 5 – Dados estatísticos resultantes das imagens geradas pelo índice NDVI.....	48
Tabela 6 – Dados das estatísticas de grade das imagens resultantes do índice NDVI.....	51
Tabela 7 – Pontos de controle para determinação das feições.....	5
Tabela 8 – Valores de mínimo e máximo para o índice SAVI.....	56
Tabela 9 – Medidas de classe em km ² para os anos de 2003, 2011 e 2016.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index
CTVI	Corrected Transformed Vegetation Index
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EVI	Enhanced Vegetation Index
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Índice de Vegetação
IVP	Infravermelho próximo
LSWI	Land Surface Water Index
GEMI	Global Environment Monitoring Index
NDSVI	Normalized Difference Senescence Vegetation Index
NDVI	Índice Normalizado da Diferença de Vegetação
NDWI	Normalized Difference Water Index
MSAVI	Índice de vegetação ajustado para solo modificado
PVI	Índice de vegetação perpendicular
RATIO	Ratio Vegetation Index
REM	Radiação Eletromagnética
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SPRING	Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	Sensoriamento Remoto
TOA	Topo da Atmosfera
TTVI	Thiam's Transformed vegetation Index
TSAVI	Índice de vegetação transformado para solos
TVI	Índice de vegetação transformado
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA.....	15
2.1	COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO.....	18
2.2	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	20
2.3	GEODÉSIA E CARTOGRAFIA APLICADA NO SENSORIAMENTO REMOTO.....	30
3	ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.1	CARACTERÍSTICA FISIAGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE PETROLINA.....	31
3.2	ÁREAS DE PERÍMETRO IRRIGADO: FRUTICULTURAS NO MUNICÍPIO DE PETROLINA.....	34
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
4.1	ANÁLISES PLUVIOMÉTRICAS.....	38
4.2	Processamento Digital de Imagem.....	40
4.2.1	Pré-Processamento.....	40
4.2.2	Etapas do Processamento.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
6	CONCLUSÕES.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A.....	73

1 INTRODUÇÃO

O bioma caatinga está localizado na região semiárida nordestina, caracterizada por apresentar uma grande extensão, “que equivale a cerca de 10% do território nacional” (SOUZA, ARTIGAS E LIMA, 2015, p. 132). Alves de Andrade *et. al.*, (2005) descrevem que a Caatinga abrange áreas no interior da região Nordeste e norte de Minas Gerais.

O bioma Caatinga tem ocorrência exclusiva no Brasil, sendo sua área principal localizada na Região Nordeste, ocorrendo também em um pequeno trecho da Região Sudeste (norte do Estado de Minas Gerais), onde domina o clima semiárido (menos de 800 mm de precipitação/ano), totalizando 734 mil km² (SOUZA, ARTIGAS E LIMA, 2015, p.132).

Segundo Cavalcante (2009) o bioma é constituído por um conjunto de biodiversidade florística e faunística, caracterizadas por serem endêmicas e adaptadas às condições climáticas das regiões semiáridas. Veloso *et. al.* (1991) classificam a caatinga como uma savana estépica, entretanto autores mais recentes como Oliveira *et. al.*, (2006) o consideram como parte de florestas tropicais secas.

As regiões localizadas no semiárido nordestino estão passando por uma série de modificações na sua cobertura vegetal em decorrência dos processos de degradação. Este fenômeno está ocorrendo devido aos procedimentos de culturas agrícolas introduzidas neste ecossistema.

A remoção parcial ou total da vegetação em áreas da caatinga resulta na redução do estoque da produção de biomassa vegetal e na diminuição da cobertura dos solos do semiárido, fatores que levam ao aumento na degradação do bioma (LIMA JÚNIOR *et. al.*, 2014, p. 290).

Os agentes antrópicos que atuam neste ecossistema estão promovendo modificações e, conseqüentemente, configurando ameaças às espécies pertencentes ao bioma devido ao uso inadequado dos recursos naturais.

As ações antrópicas têm gerado grandes impactos nas paisagens por meio do intenso processo de substituição das áreas naturais por diversos tipos de uso do solo e da fragmentação das áreas com cobertura florestal (FREIRE e PACHECO, 2017, p. 99).

Soares Filho (1998) destaca que analisar as alterações na paisagem natural é importante visto que se permite estudar o comportamento e os padrões de uso da cobertura da terra e relacionar essas modificações nos elementos de forma espacial e temporal. Neste sentido, integrar as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) no contexto agrícola, social e ambiental da região torna-se uma alternativa para identificar

e entender a dinâmica da cobertura vegetal da Caatinga. “O sensoriamento remoto, como fonte regular de obtenção de dados da superfície terrestre, constitui-se numa importante técnica para o monitoramento sistemático da dinâmica da vegetação” (SILVA, OLIVEIRA e NESS, 2012, p. 2).

Atualmente, as técnicas mais apuradas para o estudo da cobertura vegetal referem-se aos Índices de Vegetação (IV), tais como o NDVI (Índice Normalizado da Diferença de Vegetação, sigla em inglês), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e o IAF (Índice de Área Foliar). Tais índices permitem avaliar o grau de modificação provocado pela ação do homem na paisagem de domínio da Caatinga. Desta forma, a importância do IV nos estudos de cobertura vegetal pode ser assim definida:

Facilita a obtenção e modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, como a área foliar, biomassa e porcentagem de cobertura do solo, com destaque para a região do espectro eletromagnético do infravermelho, que pode fornecer importantes informações sobre a evapotranspiração das plantas (JENSEN, 2009, p.387).

“Os índices de vegetação resultam de combinações lineares de dados espectrais, realçando o sinal da vegetação, que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal” (SILVA, HAMULAK e RIBEIRO, 2012, p. 14). Wang *et. al.*, (2009) indicam o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) como um dos mais utilizados para o estudo da vegetação. Ainda de acordo com os autores, a sensibilidade destes IV torna possível realizar estudos de comparações espaciais em diferentes escalas de caráter local, regional e global.

O município de Petrolina está inserido na região do semiárido pernambucano, na mesorregião do Sertão do São Francisco, distando aproximadamente 721 km da capital Recife (CALIXTO JUNIOR, 2011). Embora localizado numa região cujas condições climáticas não são favoráveis para a produção agrícola, a proximidade do município com o submédio do São Francisco favorece a aplicação de técnicas, infraestruturas e perímetros de irrigação que representam um potencial fator econômico da região. No entanto, este fator econômico atua nos consequentes impactos e interferências na paisagem natural, no solo, nos corpos hídricos e na regeneração destas estruturas vegetais devido ao manejo de uso e ocupação do solo.

A retirada da cobertura original do solo do bioma é um dos primeiros indicadores dos processos de degradação e desertificação da região. Se a cobertura vegetal nativa é mantida, a possibilidade de qualquer degradação é pequena, e a degradação por causa antrópica é menor ainda. Portanto a desertificação tende a começar com o desmatamento (SAMPAIO *et. al.* 2005, p.101).

Neste contexto, o presente estudo visa estudar a dinâmica espacial, espectral e temporal da cobertura vegetal, agricultura irrigada e solo exposto no município de Petrolina / PE a partir de técnicas de sensoriamento remoto baseadas na avaliação de índices de Vegetação: NDVI e SAVI.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Apresentam-se aqui os objetivos desta pesquisa, divididos em objetivo geral e objetivos específicos, abaixo descritos.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a dinâmica espacial, espectral e temporal da cobertura vegetal, agricultura irrigada e solo exposto no Município de Petrolina/PE a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto baseadas na avaliação de índices de Vegetação NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) e SAVI (índice de vegetação ajustada ao solo) esperando-se obter as relações entre as variações da cobertura vegetal do bioma caatinga com o perímetro irrigado característico da região.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as técnicas de processamento digital de imagens de satélites a partir de índices de vegetação, utilizando-se de programação em linguagens de álgebra espacial específica;
- Elaborar uma análise temporal através de imagens multiespectral de diferentes datas para análise das alterações ocorridas na cobertura vegetal desse ecossistema, assim como suas causas antrópicas;
- Mapear as transformações ocorridas para os anos em estudo de forma a realizar um estudo qualitativo e quantitativo dessas mudanças.

2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA

Segundo Brasileiro (2009) o bioma caatinga localiza-se no semiárido nordestino, com extensão aproximada de 800 mil km² que recobre, total ou parcialmente, cerca de nove Estados (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e o norte de Minas Gerais), o que corresponde a cerca de 10% do território nacional. Devido ao seu grande recobrimento e à proximidade com outros ecossistemas, a Caatinga é caracterizada por apresentar distintas variações no seu ambiente faunístico e florístico. “Ainda desconhecidas e/ou não catalogadas” (ALVES *et. al.*, 2009, p. 23). Os ecossistemas que cercam a Caatinga são o cerrado e a mata atlântica, conforme se observa na Figura 1 a seguir.

Sua variabilidade espacial e temporal na composição e no arranjo de seus componentes botânicos é resposta aos processos de sucessão e de diversos fatores ambientais, onde a densidade de plantas, a composição florística e o potencial do estrato herbáceo variam em função das características de solo, pluviosidade e altitude (BISPO *et. al.*, 2010, p. 3).

Em seus estudos iniciais, Luetzelburg (1923) retrata que as características dessas vegetações são diversificadas, com algumas classificações que variam para os tipos fisionômicos e ecológicos. Devido a essa variabilidade, foi proposta uma divisão da caatinga em classes como arbustivas e arbóreas, sendo estas subdivididas em outros grupos de associações. Conforme Carvalho e Freitas (2005, p. 3) “o bioma Caatinga caracteriza-se por apresentar grande diversidade de paisagens, principalmente quanto à densidade e ao porte das plantas”.

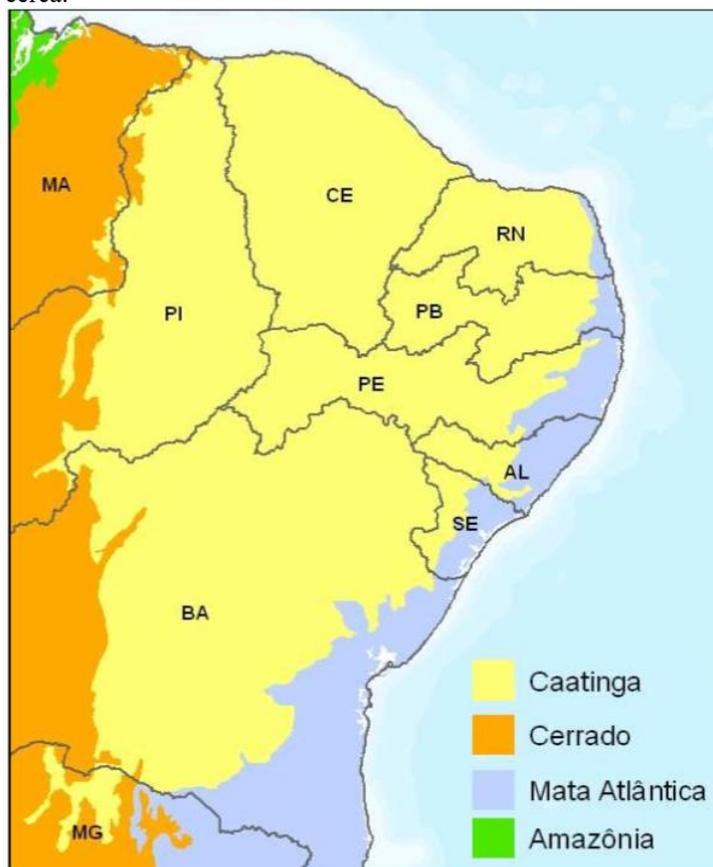
Segundo Freire *et. al.* (2003), as espécies de fisionomias Caatinga de classes arbóreas são caracterizadas por apresentar uma altura do dossel em torno de 10 m, o que as caracteriza como de grande porte. As arbustivas exibem um comprimento de aproximadamente 2,5 m.

De acordo com dados do Censo 2010 do IBGE, na região do bioma Caatinga vivem aproximadamente 26 milhões de habitantes, e destes, 38% ocupam as áreas rurais. “O Bioma Caatinga, sendo o único exclusivamente brasileiro e, ainda hoje, o menos estudado, revela um quadro social composto por um mosaico diferenciado e complexo” (FONSECA *et. al.*, 2017, p. 1).

Embora se observe uma grande riqueza nesse bioma, a Caatinga já foi considerada como uma vegetação pobre, apresentando um pequeno quantitativo de espécies arbustivo-arbóreas e cactos dispersos em sua extensão. Assim, o conhecimento

sobre este bioma pode ser considerado incompleto ou ainda desconhecido, no entanto passível de estudos devido a sua grande complexidade e o seu recobrimento (RODAL, 1992). “A Caatinga tem sido descrita como pobre em espécies e com baixo grau de endemismo, o que certamente é reflexo do pouco conhecimento sobre a região, visto ser o bioma brasileiro com menor número de inventários” (MMA, 1998 *apud* HAUFF, 2010, p. 7).

Figura 1: Mapa do bioma Caatinga representando a localização dos estados do Brasil e os demais biomas que o cerca.



Fonte: PAN- Brasil (MMA/SRH, 2004).

As regiões do semiárido apresentam uma longa estação seca (EITEN, 1982) com irregularidades pluviométricas (ANDRADE-LIMA, 1981) e precipitação anual média entre 400 e 600 mm (AB' SABER, 1977). Segundo Araújo (2011), a maior parte das regiões compreendidas por este bioma encontra-se localizada em baixas latitudes e próximas ao Equador, o que as torna áreas com altas temperaturas.

De acordo com Nimer (1977), as chuvas dessas regiões apresentam uma concentração em três ou quatro meses, não ultrapassando 50% do total anual. Araújo (2011) destaca que a presença de chuvas nas regiões semiáridas permite a formação

de rios com conseqüente absorção de água pelas estruturas vegetais, tornando-as mais verdes do que em épocas de seca.

Em relação aos solos, Lins e Albuquerque (2001) destacam que nas regiões de clima semiárido estes podem ser considerados como rasos e pedregosos pois são provenientes de rochas cristalinas, o que dificulta o acúmulo de água devido à sua impermeabilidade conforme a variação do relevo. Ainda de acordo com os referidos autores, o relevo que predomina no semiárido é “aplainado, levemente ondulado nos pediplanos sertanejos”.

Parte da diversidade florística encontrada neste ecossistema é conseqüente das adaptações que as espécies vegetais obtiveram como forma de proteção contra os agentes físicos, ambientais e antrópicos. Este fato ocorre devido ao contínuo e sistemático processo de degradação que as regiões compreendidas pelo bioma Caatinga vêm sofrendo. Fonseca *et. al.* (2017) consideram que o contínuo uso dos recursos ambientais está intensificando os impactos ambientais nessas regiões e promovendo constantes ameaças para a biodiversidade.

Devido às fortes influências dos agentes físicos, as espécies vegetais precisam se ajustar ao meio como forma de garantir sua subsistência. Neste contexto, em pesquisas realizadas na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (2007), as espécies de Caatinga adaptam-se conforme as estações do ano, com perdas de folhas, ajustes dos caules e raízes para acúmulo de água e nutrientes.

A vegetação de Caatinga possui características fisiológicas e anatômicas que impedem ao máximo a perda d'água exemplo: o caule suculento das Cactaceae, a cutícula espessa das Bromeliaceae, as túberas aquíferas de *Spondias tuberosa* (umbu) Anacardiaceae (FREIRE, 2003, p. 29).

A Figura 2 a seguir apresenta exemplos de fisionomias que podem ser encontradas nestas regiões de semiárido.

Figura 2: *Pilosocereus gounellei* e espécie de Bromeliaceae (*Encholirium spectabile martius*).



Fonte: Neison Freire e Débora Moura (2013).

Segundo Rosa *et. al.* (2003) bacias hidrográficas como Parnaíba, São Francisco, Atlântico Nordeste Oriental e Leste fazem limites com este ecossistema. No entanto, devido ao longo período de estiagem as bacias desempenham um curso mais sazonal ou intermitente. Por sua vez, Lins e Albuquerque (2001) acrescentam que apesar da hidrografia ser formada, em sua maioria por rios intermitentes, o rio São Francisco é considerado perene durante todo o ano.

Percebe-se, portanto, que embora compreendida em uma região de clima semiárido e com fortes influências de agentes físicos, antrópicos e ambientais, a Caatinga é favorecida pela presença de outros ecossistemas, o que a torna rica em biodiversidade. Os fatores ambientais em conjunto com os elementos geográficos (geologia, morfologia, pedologia e o clima) caracterizam este bioma como um sistema equilibrado. Neste sentido, o uso de ferramentas como o Sensoriamento Remoto permite acompanhar os processos atuantes nesta paisagem, além de contribuir para conservação e recuperação deste ecossistema.

2.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

O Sensoriamento Remoto (SR) consiste em uma arte e ciência para se obtenção de informações sobre determinados objetos sem que para isso seja necessário um contato físico direto com eles (JENSEN, 2009). A obtenção desses dados ocorre através dos sensores remotos utilizados pelo SR, que atuam no registro da radiação

eletromagnética (REM) dos objetos sobre a superfície terrestre. A energia conduzida pela onda eletromagnética é transformada em pulso eletrônico ou valor digital, que é proporcional a esta energia (FIGUEIREDO, 2005).

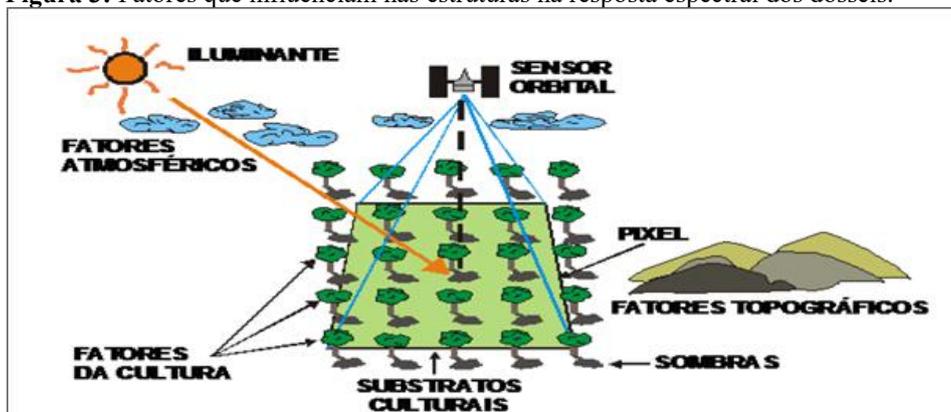
Jensen (1999) destaca que os sensores remotos são formados por detectores que atuam no registro do comprimento de onda específico para cada alvo no espectro eletromagnético. De acordo com Abreu e Coutinho (2014), os objetos que estão na superfície terrestre apresentam propriedades físico-químicas específicas e, conseqüentemente, o fluxo de REM que incide nos objetos apresenta comportamento espectral diferente. Sendo assim enquanto alguns alvos apresentam a facilidade de maior absorção, outros podem refletir ou transmitir as energias. Este comportamento dos alvos é chamado de assinatura espectral.

Segundo Novo (2010), conhecer o comportamento espectral dos alvos ou sua assinatura espectral torna-se importante no estudo do SR, pois estes permitem obter informações sobre os alvos. No estudo da característica espectral da vegetação, alguns trabalhos pioneiros como o de Gates *et. al.*, (1965), Gausmann *et. al.*, (1969) e Myers (1970) demonstraram a importância de se entender a respeito das estruturas vegetais como os pigmentos foliares, espalhamentos e conteúdo de umidade, pois estes afetam as propriedades de reflectância e a transmitância das folhas (PETERSON e RUNNING, 1989).

A estrutura foliar corresponde ao principal elemento de identificação da vegetação, nele é possível observar a partir dos processos de reflectância e do comportamento espectral, as condições das estruturas vegetais, que são influenciados pela composição química, morfológica e a estrutura interna das plantas (CURRAN, 1985; STEFEN, 1996). Freire *et. al.*(2003) citam alguns fatores que contribuem para a interferência das medidas de comportamento espectral dos alvos, dentre eles os métodos e a geometria de aquisição, os parâmetros atmosféricos e os relativos ao alvo.

Neste sentido, com o estudo da cobertura vegetal é possível entender a resposta espectral da vegetação mediante os diferentes agentes, seus processos de degradação, aumento ou redução da cobertura vegetal assim como sua intensidade (ABREU e COUTINHO, 2014). A Figura 3 ilustra os agentes que influenciam nas respostas espectrais dos dosséis.

Figura 3: Fatores que influenciam nas estruturas na resposta espectral dos dosséis.



Fonte: Albuquerque (2013).

De acordo com Novo (2010), conhecer o comportamento espectral dos alvos permite extrair as informações das imagens obtidas pelos sensores, mas também, auxilia na definição de novos sensores e tipos de processamento aos quais devem ser submetidos bem como outras técnicas de estudos.

Neste contexto, no estudo da fisionomia Caatinga entender o seu comportamento torna-se fundamental. Em estudos baseados na aplicação dos índices normalizados de vegetação, Kazmierczak (1996) destaca que as respostas fornecidas permitem detectar as áreas propícias à desertificação através de análises temporais e conhecimento das condições pluviométricas.

Por este fato, o emprego de parâmetros biofísicos da vegetação como os índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI) no processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, torna-se uma alternativa para a compreensão e a identificação das estruturas naturais da caatinga.

2.2 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Fontana *et. al.* (1998) afirmam que a aplicabilidade dos IV no processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto permite obter informações sobre a presença e as condições da cobertura vegetal monitorada. Assim, o êxito dos resultados fornecidos pelos IV está baseado na relação entre a produção primária de uma determinada comunidade vegetal com a energia solar absorvida que permite identificar o seu crescimento. “As medidas de índice de vegetação têm, em geral, associação direta com a quantidade de biomassa, o índice de área foliar, a cobertura do solo, a interceptação da radiação e o rendimento agrícola” (FONTANA, BERLATO E BERGAMASCHI, 1998, p. 1).

O estudo dos diversos tipos de vegetação é uma das principais aplicações do sensoriamento remoto. Além do monitoramento há um interesse em avaliar as propriedades biofísicas dos alvos vegetados, como por exemplo, percentagem de cobertura do solo, índice de área foliar, biomassa (EPIPHANIO, ALMEIDA E FORMAGGIO, 1996, p. 19).

Estes índices são baseados em transformações lineares das bandas espectrais, geralmente nas faixas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético (EPIPHANIO *et. al.*, 1996). De acordo com Jensen (2009), a região do vermelho absorve uma quantidade de energia radiante maior, mas com uma baixa reflectância devido à sua importância para os processos de fotossíntese. Por sua vez, para o infravermelho próximo tem pouca absorção do fluxo radiante, mas um aumento na reflectância da energia solar incidente devido à presença das estruturas vegetais e da morfologia interna das folhas.

Segundo Jensen (2009) este fenômeno acontece porque se a mesma quantidade de energia absorvida pela planta na região espectral do visível também ocorresse no intervalo do infravermelho próximo, o acúmulo de energia se tornaria maior e promoveria danos às proteínas constituintes. Com isso, o fluxo radiante que incide nesta faixa espectral do infravermelho próximo tende a ser refletido ou transmitido e direcionado para as camadas mais internas da folha ou para o solo.

Assim, compreender a resposta espectral da vegetação permite entender o funcionamento dos IV. “Os IV são mais sensíveis do que as bandas individuais quando relacionadas com parâmetros biofísicos da vegetação” (RÊGO *et. al.*, 2012, p. 1221).

A lógica por trás dos IV baseia-se não somente no fato de que a energia refletida no vermelho e no infravermelho próximo são diretamente relacionadas à atividade fotossintética da vegetação, mas também na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais pode minimizar as principais fontes de “ruídos” que afetam a resposta da vegetação (RÊGO *et. al.*, 2012, p. 1221).

Huete e Justice (1999) citam algumas condições que tornam um índice de vegetação ideal, como a capacidade de maximizar a sensibilidade das condições de vegetação, a correção das influências dos fatores externos e internos, as interferências atmosféricas e outros agentes que quando normalizados permitem realizar comparações e posteriores análises temporais.

Barbosa (2006) enfatiza que o êxito dos índices de vegetação no monitoramento da cobertura vegetal ocorre devido as diferentes reflectâncias da clorofila em determinados comprimentos de onda nas regiões espectrais do visível e infravermelho próximo. De acordo com Feitosa (2006) tem-se mais de cinquenta índices de vegetação, obtidos a partir de medidas de reflectância entre as faixas espectrais do vermelho e do

infravermelho próximo da região do espectro-eletromagnético. Alguns são funcionalmente equivalentes em termos de conteúdos de informação (PERRY e LAUTENSCHLAGER, 1984) e outros provêm informações biofísicas singulares (QI *et. al.*, 1995).

Índices de vegetação têm sido extensamente utilizados como sensíveis indicadores da presença e condição de vegetação. Estes índices baseiam-se em combinações lineares, razões ou transformações ortogonais de várias bandas espectrais. Assim, reduz-se todos os dados espectrais a um único valor, realçando a contribuição espectral da vegetação verde minimizando a do solo, a do ângulo solar, a da vegetação senescente e a da atmosfera (ALMEIDA E FONTANA, 2009, p. 18).

De acordo com Eastman (1998), o *Ratio Vegetation Index* (RATIO) foi proposto por Rouse *et. al.*, (1974) para separar a vegetação verde do solo utilizando imagem LandSAT – MSS. Meneses e Almeida (2012) descrevem que o emprego deste índice é baseado na divisão entre as bandas de maior e menor reflectância, aquelas situadas no intervalo da faixa do infravermelho próximo (IVP) e na região espectral do vermelho (V), respectivamente. Conforme demonstrado na equação abaixo.

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \quad (1)$$

Em que:

NIR: banda correspondente ao Infravermelho Próximo (Near Infra Red – NIR);

RED: banda correspondente ao vermelho.

Segundo Meneses e Almeida (2012) o resultado fornecido por este índice será maior que zero e assumirá um valor positivo em áreas de densa cobertura vegetal. O índice RVI resultará na formação de uma nova imagem monocromática, e com esta, será possível obter informações a partir da avaliação da intensidade dos níveis de cinzas. Nas regiões com maior presença de níveis de cinza tem-se alta densidade de vegetação, enquanto que para as áreas com tons mais claros, apontam a perda ou ausência de espécies vegetais, presença de corpos hídricos, solo exposto e outros alvos.

Este índice, entretanto, é suscetível a erros pela divisão por zero e a escala resultante da medida, que pode ser não linear. Em consequência, as imagens IV do RATIO não têm distribuições normais, sendo difícil de aplicar alguns procedimentos estatísticos (EASTMAN, 1998). Semelhante ao RATIO, Rouse *et. al.* (1974) desenvolveu o índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN ou NDVI). Este índice irá considerar a diferença e a soma entre as duas bandas do infravermelho próximo e do vermelho (equação 2).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

Segundo Silva (2004), o NDVI representa um IV útil na determinação de parâmetros biofísicos da vegetação, e, por considerar a razão em seu cálculo, tem-se a redução dos ruídos multiplicativos como iluminação, sombra de nuvens, fatores atmosféricos e outros. Jensen (2009) retrata alguns fatores importantes que devem ser considerados para a aplicação deste índice, considerando no estudo mudanças sazonais e interanuais, assim como a atividade de monitoramento da cobertura vegetal. Assim o NDVI apresenta como resultado uma imagem espectral monocromática cujos valores de máximo e mínimo variam em torno de 1 a -1, respectivamente.

Os valores mais próximos de 1 indicam regiões com baixa concentração de níveis de cinza, e representam áreas com presença de vegetação. Enquanto que para valores próximos a -1, observa-se tonalidades mais escuras de níveis de cinza e descrevem a presença de recursos hídricos, solo exposto e outras classes. O Quadro 1 apresenta um exemplo dos valores resultantes da utilização dos índices RVI e NDVI nas imagens monocromáticas geradas, sendo observada os alvos de: vegetação, solo exposto e água dentro do intervalo considerado.

Quadro 1: Comparação dos resultados de NDVI e RATIO para as diferentes classes de alvos.

	<i>Banda 4</i>			<i>Banda 3</i>			<i>4/3</i>			<i>4-3/4+3</i>		
<i>vegetação</i>	95	106	85	8	9	10	11,8	11,7	8,5	0,84	0,84	0,79
	84	76	114	8	8	11	10,5	9,5	10,4	0,78	0,81	0,82
	74	77	80	6	8	11	12,3	7,0	10,0	0,85	0,75	0,82
<i>solo exposto</i>	56	62	58	28	30	29	2,07	2,06	2,0	0,34	0,35	0,33
	61	63	60	28	31	28	2,18	2,03	2,14	0,37	0,34	0,36
	57	69	57	28	29	28	2,03	2,38	2,03	0,34	0,41	0,34
<i>Água</i>	4	3	3	6	6	2	0,6	0,5	0,6	-0,2	-0,33	-0,25
	4	2	3	5	5	4	0,8	0,4	0,75	-0,11	-0,42	-0,14
	3	2	3	3	3	4	1,0	0,66	1,0	-0,16	-0,2	-0,14

Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Apesar do índice de vegetação por diferença normalizada ser aplicado em diversos estudos de monitoramento da cobertura vegetal, Huete *et. al.*, 2002a; Wang *et. al.*, 2005, enumeram algumas desvantagens do NDVI como a sensibilidade deste IV às variações do substrato do dossel e às influências dos efeitos ruidosos devido a sua razão não ser considerada linear. Outros IV, como o índice de vegetação transformado ou *transformed vegetation index* (TVI), proposto por Deering *et. al.* (1975), também fazem

uso das bandas espectrais utilizadas pelo RVI e o NDVI, e sua equação é descrita na equação 3.

$$TVI = \sqrt{\left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right)} + 0.5 \quad (3)$$

O uso da raiz quadrada e a adição de uma constante ($L= 0.5$) proporcionam a estabilização dos dados estatísticos e consequentes distribuição destes, o que evita valores negativos (EASTMAN, 1998). O CTVI (*Corrected Transformed Vegetation Index*) é um índice proposto por Perry e Lautenschlager (1984) que consiste na correção do TVI, e para isso faz uso de uma constante de valor 0.5 que é adicionado ao NDVI.

$$CTVI = \frac{NDVI + 0.5}{|NDVI + 0.5|} \times \sqrt{|NDVI + 0.5|} \quad (4)$$

Embora seja adotado um valor de 0.5 para a constante, o resultado gerado pelo CTVI poderá assumir valores negativos, pois se torna difícil eliminar a presença dos saldos negativos (MARCUSI, 2010).

Em consequência da adição de uma constante ao índice NDVI, os resultados fornecidos pelo CTVI são imagens monocromáticas com presença de efeitos ruidosos e cujos valores de vegetação verde podem ser considerados superestimados (EASTMAN, 1998). Para corrigir tais efeitos, Thiam (1997) propôs o TTVI (*Thiam's Transformed vegetation Index*) que passa a desconsiderar o primeiro termo da equação do CTVI e considera, apenas, os valores da raiz quadrada dos dados absolutos.

$$TTVI = \sqrt{|NDVI + 0,5|} \quad (5)$$

Alguns IV, como o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), índices de vegetação transformado para solos (TSAVI), índice de vegetação ajustado para solo modificado (MSAVI) e índice de vegetação perpendicular (PVI) são descritos por Oliveira, Jarenkov e Rodal (2007) como índices híbridos. Estes atuam na redução dos efeitos ruidosos, pois consideram o uso da razão e minimizam o efeito do brilho do solo em regiões cuja vegetação é considerada esparsa, estando baseada no conceito da linha do solo.

Uma linha de solo é uma equação linear que descreve o relacionamento entre valores de refletância na banda vermelha e infravermelha para pixels de solo

exposto. Essa linha é produzida realizando-se uma regressão linear simples entre as duas bandas, em uma amostra de pixels de solo exposto. Uma vez conhecido o relacionamento, todos os pixels desconhecidos em uma imagem que possuem a mesma relação nos valores de refletância no vermelho e infravermelho são assumidos como solo exposto (MARCUSI *et. al.*, 2010).

O SAVI foi criado por Huete (1988) com o propósito de amenizar o efeito do solo. Jensen (2009) cita a aplicação de um fator de ajuste (L) que atua na correção das influências do solo e das condições atmosféricas.

$$SAVI = \frac{(NIR - R)}{(L + NIR + RED)}(1 + L) \quad (6)$$

Onde:

L representa um fator de ajuste que atua no substrato do dossel. (Huete, 1988; Huete *et. al.*, 1992; Karnieli *et. al.*, 2001).

Segundo Huete e Liu (1994), o fator de ajuste L pode variar entre 0 e 1. No entanto, quando considerado o valor 0.5, este irá atuar na redução do brilho do solo e na necessidade de se realizar a calibração considerando diferentes solos. Baret e Guyot (1991) introduziram o índice TSAVI, no qual é assumido que a linha do solo apresenta uma determinada inclinação e é considerado um valor arbitrário e estes são utilizados para o ajuste do índice, conforme se observa na equação abaixo.

$$TSAVI = \frac{a(NIR - aR - b)}{(bNIR + R - ab + X[1 + a^2])} \quad (7)$$

Onde:

X corresponde ao parâmetro de redução dos efeitos do fundo do solo; “a” e “b” representam a linha do solo.

O índice de vegetação ajustado para o solo modificado (MSAVI) foi desenvolvido por Qi *et. al.* (1994) e, diferente do SAVI, o fator de correção L é calculado (equação 9) de forma a não se utilizar um valor arbitrário, representando a densidade da cobertura vegetal.

$$MSAVI = \frac{(NIR - R)}{(L + NIR + RED)}(1 + L) \quad (8)$$

Onde, L é representado pela seguinte equação:

$$L = 1 - 2a \cdot NDVI / W DVI \quad (9)$$

Richardson e Wiegand (1977) desenvolveram o índice de vegetação perpendicular (PVI), que atua na minimização da interferência da reflectância da superfície do solo abaixo da vegetação e pode ser calculado pela seguinte equação.

$$PVI = \frac{NIR - aR - B}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (10)$$

Onde:

a= intersecção da linha do solo e b= inclinação da linha do solo

Este índice representa a distância perpendicular entre o ponto da vegetação e a linha da superfície do solo abaixo da vegetação, calculada pela coordenada de pixel e definida pelos eixos das reflectâncias do infravermelho e do vermelho em um plano cartesiano (ANDRADE, 2014). Além destes índices de ajustes ao solo, outros IV (como o índice de área foliar (IAF)) são aplicados no monitoramento das culturas agrícolas. “O acompanhamento das culturas agrícolas ao longo de sua estação de crescimento possibilita a estimativa da produtividade antes da colheita” (SUGAWARA *et. al.*, 2009, p. 499).

Ponzoni e Simabukuru (2007) indicam em seus estudos a presença de outros índices aplicados para a correção dos efeitos atmosféricos, como ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), GEMI (*Global Environment Monitoring Index*) e o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), conforme se apresenta no Quadro 2.

Quadro 2: Índices de vegetação aplicado para efeitos de correção atmosférico

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA MINIMIZAR OS EFEITOS ATMOSFÉRICOS	
ARVI <i>(Atmospherically Resistant Vegetation Index)</i>	<p>Este índice foi proposto por Kaufan e Tanré (1992), com o objetivo de ser aplicado para detectar vegetação em imagens do sensor “<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>” (MODIS –EOS) e reduzir a dependência do antigo NDVI das condições atmosféricas. Na formulação desse índice são usadas as imagens da banda do azul, vermelho e do infravermelho próximo. Em 1993, Kaufman e Holben afirmaram que a reflectância da vegetação detectada na região do vermelho é menor que na faixa do infravermelho, sendo assim, mais sensível aos efeitos atmosféricos. Na expressão do ARVI, usa-se a radiância normalizada vermelho-azul*_{rb}, que é mais resistente aos efeitos atmosféricos. A expressão é dada pela equação 24:</p> $ARVI = \frac{(\rho^{*NIR} - \rho^{*RB})}{(\rho^{*NIR} + \rho^{*RB})} \quad (24)$ <p>Onde:</p> $\rho^{*RB} = \rho^r - \gamma(\rho^b - \rho^r)$ <p>γ- é o parâmetro não específico depende do tipo de aerossol, tem como objetivo de reduzir o efeito da atmosfera.</p> <p>Ainda ressalta-se que o melhor valor para aplicações em Sensoriamento Remoto é $g=1$ e define o peso da Radiância da banda azul na definição do ARVI.</p>

GEMI (Global Environment Monitoring Index)	<p>Pinty e Verstraete (1992), propuseram para o monitoramento global da vegetação este novo índice GEMI, sendo caracterizado pela transmissão com a razão do Índice de Vegetação no topo da atmosfera sobre o seu valor máximo na superfície terrestre. Essa transmissão atende alguns requisitos como deve ser mais sensível possível em relação aos diferentes valores de índices, às variações da espessura óptica da atmosfera e ser empiricamente representativo da cobertura da vegetação de maneira que o Sensoriamento Remoto e o NVDI sejam comparados. A expressão do GEMI é dada pela equação 25:</p> $GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) \frac{\rho_r^{-0.125}}{1 - \rho_r} \quad (25)$ <p>Onde η é dada pela equação 26 :</p> $\eta = \frac{2(\rho_{nir}^2 - \rho_r^2) + 1.5\rho_{nir} + 0.5\rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r + 0.5} \quad (26)$ <p>Os valores para o GEMI variam entre 0 e +1 sobre áreas continentais.</p>
EVI (Índice de Vegetação Melhorado)	<p>Esse índice foi desenvolvido para agilizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com maiores densidade de biomassa, e para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel. A expressão do EVI é dada pela equação 27:</p> $G = \frac{(NIR - Vermelho)}{(L + NIR + C_1Vermelho - C_2Azul)} \quad (27)$ <p>Onde: L é o fator de ajuste para o solo; G é o fator de ganho C1 e C2 – coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera.</p> <p>Valores para os coeficientes: L=1, C1=6,c2=7,5 e G=2,5</p>

Fonte: Adaptado de Ponzoni e Shimabukuro (2007) e Monteiro (2013).

De acordo com Lucchesi (1987), quando se conhece o ciclo de uma determinada cultura agrícola é possível analisar a capacidade que a área foliar irá ocupar na região do solo disponível aquela vegetação. “O índice de área foliar (IAF) é um parâmetro biofísico que pode ser utilizado como medida de crescimento das plantas nos modelos

agronômicos” (SUGAWARA *et. al.*, 2009, p. 499). Dessa forma, o IAF pode ser calculado pela seguinte equação.

$$IAI = \frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (11)$$

Segundo Eastman (2003) índices como SAVI e suas derivações como TSAVI e MSAVI, apresentam resultados satisfatórios quando aplicados em ambientes semiáridos, o que pode ser justificado devido a sua atuação no efeito do solo. Além destes, Han *et. al.* (2008) cita outros índices como o EVI (*Índice de Vegetação Melhorado*), LSWI (*Land Surface Water Index*) e NDSVI (*Normalized Difference Senescence Vegetation Index*) indicados para estudos em regiões semiáridas. No quadro 3 são apresentadas as características destes índices.

Quadro 3: Descrição dos Índices de Vegetação NDSVI e LSWI

TIPOS	DESCRIÇÃO
LSWI (<i>Land Surface Water Index</i>)	<p>LSWI foi calculado a partir de reflectância de superfície como uma razão normalizada entre a banda 2 (841-876 nm) e a banda6 (1628-1652 nm) do sensor MODIS, foi desenvolvido para calcular a quantidade de água na vegetação (Xiao <i>et al.</i>, 2005). A expressão da equação do LSWI é dada pela equação 28:9</p> $LSWI = \frac{\rho_{RED} - \rho_{SWIR}}{\rho_{RED} + \rho_{SWIR}} \quad (28)$ <p>Onde ρ_{RED} e ρ_{SWIR} são correções atmosféricas das reflectâncias de superfície no comprimentos de onda em vermelho e infravermelho.</p> <p>ρ_{RED} = comprimento de onda na faixa espectral do vermelho;</p> <p>ρ_{SWIR} = comprimento de onda na faixa espectral do infravermelho.</p>

NDSVI (<i>Normalized Difference Senescence Vegetation Index</i>)	<p>O NDSVI é também obtido a partir de reflectância de superfície e a expressão é dada pela equação 29:</p> $NDSVI = \rho_{SWIR} - \rho_{RED} / \rho_{SWIR} + \rho_{RED} \quad (29)$ <p>Onde:</p> <p>ρ_{SWIR} = comprimento de onda na faixa espectral do infravermelho;</p> <p>ρ_{RED} = comprimento de onda na faixa espectral do vermelho.</p> <p>O LWSI e NDSVI são corrigidos atmosféricamente na faixa da reflectância do infravermelho e no vermelho, respectivamente. Esses índices são sensíveis ao teor de água na vegetação e são interessantes para serem calculados em imagens de períodos secos e chuvosos (março e novembro).</p>
--	--

Fonte: Adaptado de Han *et. al.* (2008) e Monteiro (2013).

Para o desenvolvimento de estudos da cobertura vegetal o entendimento das formas da resposta espectral da vegetação torna-se uma possibilidade na determinação das ocorrências de supressão, aumento da cobertura de vegetação, ou ainda redução de sua intensidade (ABREU e COUTINHO, 2014). Com estes estudos torna-se possível mapear as regiões de cobertura vegetal, assim como explorar e extrair informações pertinentes para análise de conservação ambiental.

2.3 GEODÉSIA E CARTOGRAFIA APLICADA NO SENSORIAMENTO REMOTO

Compreender o comportamento do campo gravitacional da Terra representa um dos pontos essenciais do estudo da Geodésia. Saatkamp, Moraes e Farret (2009) descrevem que com o uso de Sistema de Posicionamento Global (GPS) é possível conhecer a posição de um satélite, a partir da determinação das coordenadas de um ponto pelo receptor do usuário, com o reconhecimento das coordenadas do satélite durante o intervalo de propagação do sinal.

Entretanto, torna-se necessário referenciar os objetos à uma superfície terrestre, e isto só é possível através dos sistemas de coordenadas geográficas e

Universal Transversa de Mercator (UTM). A escolha de um destes sistemas está baseada conforme a escala e o nível de detalhamento ao qual se deseja trabalhar, sendo assim para se mapear as mudanças ocorridas ao longo do tempo, em um contexto geoespacial e espectro-temporal, a cartografia torna-se uma ferramenta importante, pois, “A cartografia é a ciência da representação e do estudo da distribuição espacial dos fenômenos naturais e sociais, suas relações e suas transformações ao longo do tempo, por meio de representações cartográficas” (LUNKES e MARTINS, 2009, p. 5).

Neste contexto, para este trabalho foi utilizado pontos de controle com a finalidade de estabelecer melhores níveis de classificação para os alvos de fisionomia caatinga, solo exposto, cultura irrigada e água/sombra de nuvem.

3 ÁREA DE ESTUDO

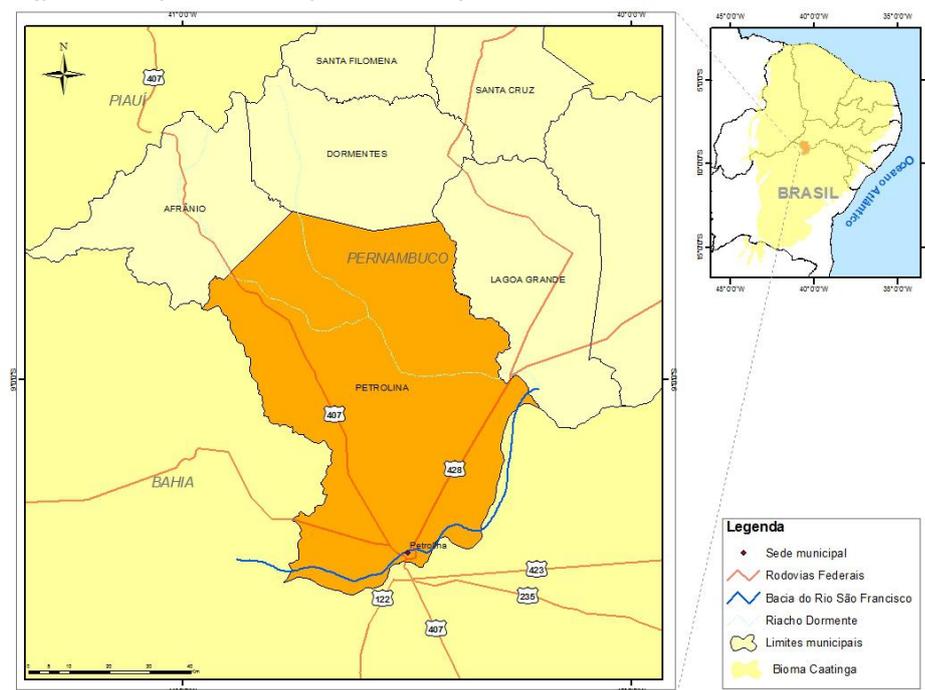
3.1 CARACTERÍSTICA FISIOGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE PETROLINA

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o município de Petrolina encontra-se próximo à cidade Juazeiro, localizada na margem oposta à bacia do rio São Francisco. O acesso entre essas duas cidades é possível a partir de um caminho, que denominou inicialmente a cidade de Petrolina como: “Passagem de Juazeiro”. Além deste caminho, Petrolina, também serve de acesso para outros estados como: Piauí, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Ainda de acordo com o IBGE, existe uma divergência quanto à origem do nome municipal, pois, alguns citam que foi designado como homenagem ao Imperador Dom Pedro II, mas Santana Padilha retrata em sua obra “Pedro e Lina” que devido ao seu sotaque Italiano, durante a pronúncia desses nomes ouviu-se Petrolina.

Em relação a sua localização, o município encontra-se inserido na região semiárida do estado de Pernambuco (Figura 4), distando 721 km da capital Recife (CALIXTO JUNIOR, 2011). De acordo com o novo recorte geográfico proposto pelo IBGE (2017) o município de Petrolina está inserido na Região Geográfica Intermediária, cujos municípios apresentam um polo de hierarquia diferenciado com presença de gestão privada e pública.

Figura 4: Mapa de localização do município de Petrolina-PE



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

“A sede municipal está localizada nas coordenadas 9°23’55” de latitude Sul e 40°30’03” de longitude Oeste, a uma altitude de aproximadamente 376 metros (IBGE, 2007). De acordo com os dados do último censo demográfico, a população estimada para o município corresponde a 337.683 habitantes distribuídos ao longo de uma área da unidade territorial de 4.561,874km² (IBGE, 2016) e apresenta uma participação no produto interno bruto (PIB) no estado Pernambuco com cerca de 3,37% (CONDEPE, 2014).

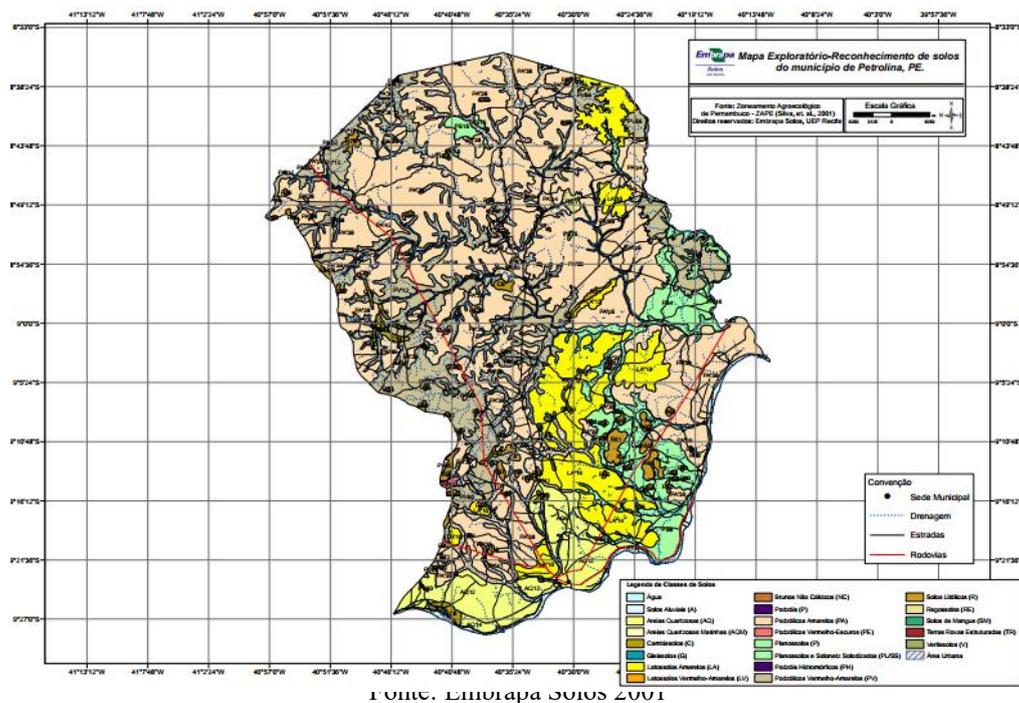
Petrolina é banhada pela bacia hidrográfica do São Francisco, principal rio de disponibilização de água, com aproximadamente 2.700km de comprimento e uma área de drenagem em torno de 640.000km² que representa 7,5% do território nacional. A bacia é dividida em regiões fisiográficas definidas por alto, médio, submédio e baixo do São Francisco, estando Petrolina inserida na área do submédio (DA SILVA, GALVÍNCIO e ALMEIDA, 2010).

Dados da Superintendência de Estudos Econômico e Sociais da Bahia (1998) enquadram as condições climáticas do município de Petrolina no tipo Bswh’ da classificação de Köppen, com clima semiárido e duas estações bem definidas. Lacerda *et. al.* (2010) classificam os períodos de maior precipitação compreendidos no período

de fevereiro a abril, enquanto os valores de mínimos estão ente os meses de junho e setembro. De acordo com as informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média compensada para o município de Petrolina foi de aproximadamente 25,8°C, 26,01°C e 26,19°C correspondendo os anos de 2003, 2011 e 2016, respectivamente.

Quanto aos aspectos geomorfológicos considera-se “Depressão Periférica do São Francisco, indo do terraço fluvial até o tabuleiro sertanejo, o terraço fluvial é formado por depósitos aluviais das encostas de um vale” (SILVA *et. al.*, 2016, p. 329). O relevo é predominante suave-ondulado, característico de ambientes semiáridos (FERREIRA *et. al.*, 2012).

Figura 5: Mapa Geológico de Petrolina-PE



Segundo Eiten (1983) variabilidade da vegetação se dá devido às influências do solo, relevo e da disponibilidade hídrica da região. Neste sentido, a fisionomia da cobertura vegetal varia conforme a proximidade dos recursos hídricos, isto é, em áreas de maior proximidade com os corpos hídricos, tem-se a presença da caatinga de floresta ciliar (ANDRADE-LIMA, 1981), enquanto que as situada nas regiões mais afastadas do rio é denominada caatinga arbustivo-arbórea (NASCIMENTO, 1998). Petrolina é formado pela presença de “vegetação caatinga arbustivo-arbórea, hiperxerófila, com trechos de floresta caducifólia” (FERREIRA *et. al.*, 2012, p. 907).

Devido à presença da estação seca prolongada e os períodos curtos de chuvas, a vegetação dessas regiões do semiárido passou por adaptações e modificações nas suas estruturas vegetais. Moura *et. al.* (2007) destacam que as transformações se iniciam nas estruturas anatômicas e fisiológicas, que atuam para a diminuição da perda de água, bem como no desenvolvimento de órgãos subterrâneos para o armazenamento destas.

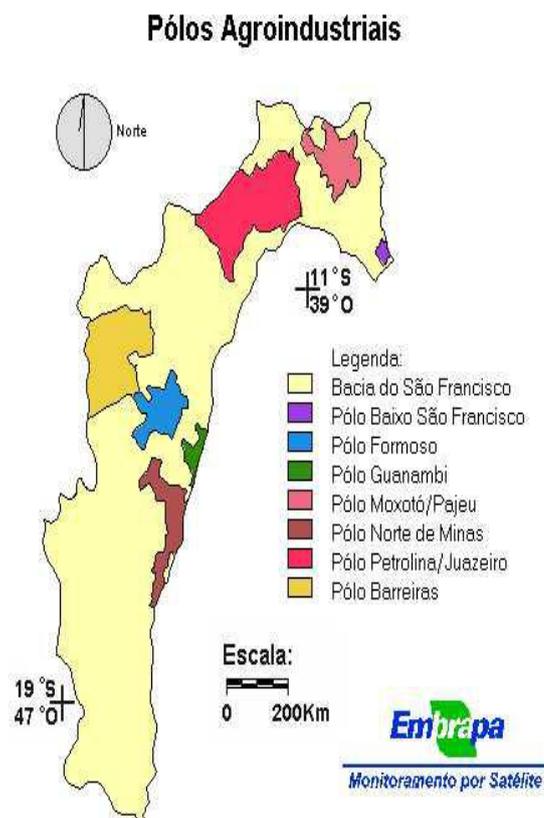
3.2 ÁREAS DE PERÍMETRO IRRIGADO: FRUTICULTURAS NO MUNICÍPIO DE PETROLINA

Devido as variáveis climáticas e a disponibilização de recursos hídricos das regiões de clima semiárido, algumas medidas governamentais foram propostas com a finalidade de minimizar os efeitos sobre as condições de subsistência da região. Destacam-se a implantação de áreas de perímetro irrigado e a produção agrícola representam como exemplos incentivados pelo governo.

Para amenizar o fenômeno das secas que, frequentemente, provoca perdas das produções agrícolas na região semiárida do Nordeste brasileiro [...], o governo tem implantado diversos perímetros irrigados ou investido em locais com potencial para desenvolver agropecuária de sequeiro na região. Através dessas iniciativas, o governo tem criado importantes centros de produção agrícola, no que diz respeito às pequenas, médias e grandes empresas de produção de frutas e hortaliças [...] (CORREIA, ARAÚJO e CAVALCANTI, 1997, p. 1).

De acordo com Marinozzi e Correia (1999) as regiões localizadas no submédio do São Francisco (Polo Juazeiro-BA e Petrolina-PE) apresentam como fator histórico contribuinte para o crescimento econômico a agropecuária, favorecendo assim a absorção da mão de obra local e a geração de renda através da exportação de produtos para outras regiões. Ainda de segundo Marinozzi e Correia (1999) devido às implantações e os investimentos nesses recursos, as características da agricultura de subsistência sofreram transformações no contexto da perda de espaço ou na integração ao tipo de produção agroindustrial.

Figura 6: Polos de irrigação e suas principais relações entre a área irrigada e a área total da micro-bacia (%)



Fonte: ANA, 2004

Segundo Taura *et. al.* (2011) no município de Petrolina foram estabelecidas áreas de perímetro irrigado e de infraestrutura de irrigação, distribuídas em três zonas: sequeiro, perímetro de irrigação e de ribeirinha (Figura 8). Estas são caracterizadas de acordo com a forma de acesso e captação da água. A zona de sequeiro faz uso dos recursos hídricos que são provenientes da chuva e não utiliza dos corpos d'água da bacia do rio São Francisco, com os cultivos agrícolas predominantemente irrigados a partir dos riachos e corpos hídricos temporários.

Dentro da área de sequeiro está presente à zona de perímetro de irrigação, agricultura ser intensiva destaca-se na paisagem. A zona de ribeirinha, por sua vez, localiza-se nas margens do rio São Francisco, favorecendo o bombeamento e distribuição dos recursos hídricos sem a necessidade de adoção de infraestrutura.

Figura 7: Caracterização das zonas de implantação das áreas irrigadas, sequeiro e ribeirinha.



Fonte: Secretaria de Educação Fundamental. –Brasília 1997.

Segundo a Embrapa (2007), diante da dependência do período chuvoso para a implantação dos cultivos agrícolas, algumas plantações são incentivadas. Entre elas destacam-se o feijão, guandu, milho, mandioca e melancia, pois estas se caracterizam como de subsistência. O município de Petrolina tem reconhecimento nacional devido à produção de frutas irrigadas, sendo a uva e a manga os grandes destaques.

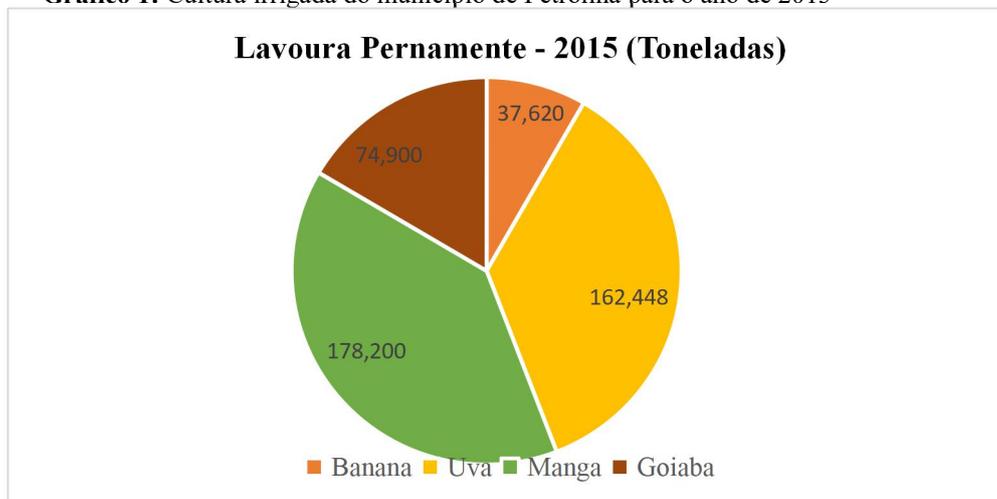
A implantação dos polos de irrigação, associados às condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro, notadamente nos Perímetros Irrigados do Vale do São Francisco, em Petrolina-PE/Juazeiro-BA, tem propiciado uma ampla diversificação agrícola e uma grande melhoria socioeconômica à região. Este importante polo de irrigação de frutas, embora não explore ainda suficientemente o seu potencial de produção de frutas, tem aumentado a eficiência da produção agrícola, importante fator na ampliação, diversificação e desenvolvimento do parque agroindustrial desta região (EMBRAPA, 2007, p. 1).

De acordo com Lacerda (2004) as frutas produzidas no polo Petrolina/Juazeiro conseguem atender às necessidades do mercado interno e posterior demanda para a exportação devido às condições favoráveis nos quais estão submetidas.

O Gráfico 1 apresenta dados último censo do IBGE sobre a lavoura permanente das frutíferas e sua respectiva quantidade produzida em toneladas para o ano de 2015 no

município de Petrolina. A representação destas áreas de cultura pode ser verificada nas Figura 8, a seguir.

Gráfico 1: Cultura irrigada do município de Petrolina para o ano de 2015



Fonte: IBGE, 2015

Figura 8: Áreas destinadas ao cultivo da mangueira e videira (uva), respectivamente.



Fonte: Luciano Accyoli, Embrapa (2013).

Correia, Araújo e Cavalcanti (2001) relatam que o investimento na fruticultura irrigada é uma alternativa para o crescimento dessas regiões localizadas no submédio do São Francisco, pois contribui para a introdução e expansão de setores como indústria, comércio e o turismo, além de proporcionar um grande dinamismo na economia. Por sua vez, Parente e Barbosa *et. al.* (2011), alertam que a crescente necessidade e busca por novas áreas para a introdução da agricultura irrigada promove mudanças nas características da cobertura vegetal o que contribui para a exploração irracional e na sua destruição.

Neste sentido, apesar da necessidade de investir nos setores da agricultura irrigada como um instrumento no desenvolvimento econômico de uma determinada

região torna-se necessário acompanhar a introdução das áreas destinada ao cultivo. Este fato se justifica pelas alterações da cobertura vegetal e das perdas de espécies endêmicas predominante no bioma Caatinga.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento deste trabalho baseia-se na análise de índices de vegetação (NDVI e SAVI) no estudo da dinâmica geoespacial e espectro-temporal da vegetação de Caatinga, cultura irrigada e solo exposto no município de Petrolina para os anos de 2003, 2011 e 2016, utilizando-se de técnicas de sensoriamento remoto. Foi realizada, à priori, uma avaliação das informações pertinentes da área de estudo. Para isso foram consultados estudos em livros, artigos e outras publicações científicas, cuja abordagem encontrava-se direcionada ao tema proposto.

A aquisição das imagens trabalhadas neste estudo se deu em consulta ao site da *United States Geological Survey (USGS)*. A escolha foi baseada nas datas de término do período chuvoso do município de Petrolina, e, portanto, utilizou-se o monitoramento pluviométrico no site da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Os dados referentes à situação demográfica da região de estudo foram obtidos consulta ao site do IBGE. Para validar os resultados obtidos foi realizada uma visita à Embrapa, adquirindo-se coordenadas de identificação das áreas de Caatinga, Perímetros irrigados e produções agrícolas.

Com esses dados delimitaram-se nas bases das imagens de satélite (2003, 2011 e 2016) as áreas de predominância da vegetação Caatinga onde se percebeu a dinâmica comportamental do município nas alterações deste bioma e as consequentes interferências da cultura agrícola. Desse modo fez-se a aplicação dos índices de vegetação nas regiões de predominância do bioma caatinga. Os resultados permitiram comparar e estabelecer a possível relação entre a expansão do perímetro agrícola com o crescimento das demais áreas do perímetro urbano no decorrer dos anos em estudo.

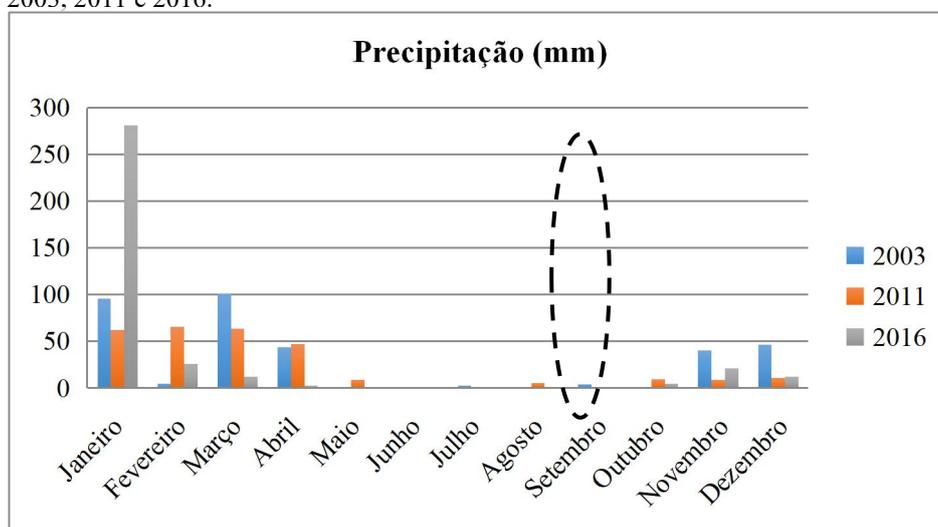
4.1 ANÁLISES PLUVIOMÉTRICAS

A época escolhida para o estudo corresponde ao fim do período chuvoso do município de Petrolina. Esta escolha foi baseada nas diferentes respostas espectrais que a vegetação Caatinga proporciona na presença de água, consequência das suas características fisiológicas para adaptação ao período de seca.

Fez-se uso de imagens com cobertura nuvens abaixo de 20% para o ano de 2016 e em torno de 30% para as cenas do ano de 2003 e 2011. Foram consultados os dados de monitoramento pluviométrico da APAC referentes à precipitação mensal, considerando o posto hidrológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizado no município de Petrolina.

No mês de agosto foi observada uma precipitação de 0,4, 5,4 e 0,6mm nos anos de 2003, 2011 e 2016 respectivamente, conforme observado no Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2: Dados pluviométricos comparativos de chuvas acumuladas para o ano de 2003, 2011 e 2016.



Fonte: APAC, 2017.

Além desta análise foram considerados para a escolha das imagens orbitais os valores da precipitação diária no período de 10, 30 e 60 dias antes da passagem do satélite conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1: Precipitação (mm) diária nos períodos antes da obtenção das imagens

Datas	Até 10 dias antes da passagem	Até 30 dias antes da passagem	Até 60 dias antes da passagem
07/08/2003	0,4	2,9	0,0
29/08/2011	0,2	5,4	0,6
10/08/2016	0,0	0,0	0,0

Fonte: Apac, 2017.

Como observado para 10 dias antes da obtenção da imagem a precipitação foi de 0,4, 0,2 e 0,0 para os anos de 2003, 2011 e 2016 respectivamente. Com este estudo pluviométrico é possível entender o comportamento e as respostas dos índices de vegetação utilizados, pois estes são influenciados pela presença de umidade no solo.

4.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Apresentam-se aqui os procedimentos de processamento das imagens utilizadas no estudo.

4.2.1 Pré-Processamento

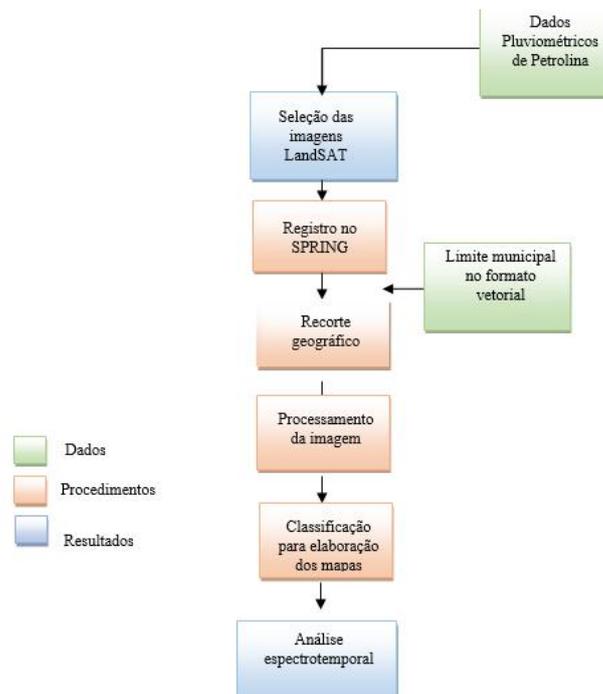
Para este estudo utilizou-se de imagens de satélites obtidas no site da *United States Geological Survey (USGS)*. Foram no total 6 imagens do satélite LandSAT 5, sensor TM (*Thematic Mapping*) de órbita 217 e pontos 66 e 67 para os períodos de 07 de agosto de 2003 e 29 de agosto de 2011, além de três imagens do satélite LandSAT 8, sensor OLI, de órbita/ponto 217/66 datada em 10 de agosto de 2016.

As imagens foram inseridas no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, *software* SPRING versão 5.5, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nele foram criados os Planos de Informação (PI) de categoria Imagem dos modelos de dados para os anos considerados, e em seguida importados para os seus respectivos PI.

Para a delimitação da área de estudo utilizou-se o *software* QGIS (versão 2.18.3). A partir da base de dados do IBGE da Malha Digital de Municípios, foi selecionada a camada vetorial do município na extensão shapefile (*.shp). Este polígono foi introduzido no SPRING com PI cadastral e nele foi realizado o recorte do plano de informação determinando-se a região de Petrolina.

Na aplicabilidade dos índices de vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do índice de vegetação ajustada ao solo (SAVI), as bandas espectrais utilizadas foram B4 e B3 para as imagens dos satélites LandSAT 5, sensor TM e B5 e B4 para o LandSAT 8, sensor OLI, pois estas representam o intervalo do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. A Figura 9 apresenta um fluxograma geral com as etapas do processamento dos dados e os resultados obtidos.

Figura 9: Fluxograma desenvolvido para a metodologia do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

4.2.2 Etapas do Processamento

4.2.2.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

a) Calibração radiométrica

A calibração radiométrica foi proposta por Markham & Barker (1986) e consiste numa conversão do número digital (ND) para valores de reflectância aparente (equação 12). Essa transformação foi aplicada para as imagens orbitais do satélite LandsAT 5, sensor TM, para os anos de 2003 e 2011.

$$L\lambda_i = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (12)$$

Onde:

$L\lambda$ = radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); “a” e “b” = radiâncias espectrais mínimas e máximas ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); ND = Número digital de cada pixel e $Dn_{máx} = 255$, pois a resolução radiométrica para as imagens de satélite LandsAT 5 é 8 bits.

Os valores utilizados para a radiância espectral mínima e máxima, ou seja, “a” e “b” para os anos de 2003 e 2011 foi aproveitado da adaptação proposta por Chander *et al.* 2009, conforme observado no quadro 4.

Quadro 4: Coeficientes de calibração para as respectivas bandas espectrais do satélite LandsAT 5.

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)				Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera - $K_{\lambda i}$ ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)
		a desde 1994	b 01/03/1994 a 04/05/2003	b 05/05/2003 a 01/04/2007	b depois de 02/04/2007	
1 (azul)	0,452 – 0,518	-1,52	152,10	193,0	169,0	1983
2 (verde)	0,528 – 0,609	-2,84	296,81	365,0	333,0	1796
3 (vermelho)	0,626 – 0,693	-1,17	204,30	264,0	264,0	1536
4 (IV-próximo)	0,776 – 0,904	-1,51	206,20	221,0	221,0	1031
5 (IV-médio)	1,567 – 1,784	-0,37	27,19	30,2	30,2	220
6 (IV-termal)	10,450 – 12,420	1,2378	15,303	15,303	15,303	-
7 (IV-médio)	2,097 – 2,349	-0,15	14,38	16,5	16,5	83,44

Fonte: Adaptado de Chander *et. al.* (2009).

Os valores dos parâmetros utilizados para o canal do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IV) neste estudo podem ser observados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Coeficientes de Calibração utilizados para os anos de 2003 e 2011.

Parâmetros	2003		2011	
	Vermelho	Infravermelho Próximo	Vermelho	Infravermelho Próximo
a	-1,17	1,51	-1,17	1,51
b	264	221	264	221
K_{λ}	1536	1031	1536	1031

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

A radiância monocromática, resultado da conversão proposta acima, será utilizada na equação de Bastiaanssen (1995) e o resultado irá corresponder a uma nova imagem de reflectância monocromática. Segundo Pereira *et. al.* (1996), com o valor da reflectância é possível analisar e monitorar o comportamento de uma determinada cobertura vegetal a partir das respostas espectrais fornecidas devido às variações da estrutura vegetal.

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos(Z_{dr})} \quad (13)$$

Onde:

$\rho_{\lambda i}$ = reflectância monocromática de cada banda ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); L_{λ} = radiância espectral monocromática ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); $k_{\lambda i}$ = irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); Z = ângulo zenital solar no momento da aquisição e dr = quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol em dado dia do ano.

A determinação do quadrado da razão entre a distância Terra-Sol (dr) se deu a partir do uso da equação proposta por Duffie & Beckman (1980) expressa por:

$$dr = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(DOY \frac{2\pi}{365}\right) \quad (14)$$

Onde:

DOY corresponde ao dia Juliano do ano e o ângulo é dado em radianos.

Para as cenas de estudo datadas em 07 de agosto de 2003 e 29 de agosto de 2011 o DOY encontrado foi de: 219 e 241, respectivamente. Este resultado foi substituído na equação proposta por Duffie e Beckman (1980) e se obteve um valor de “dr” correspondente a 1,032928592 e 1,0329135317 para os respectivos anos. A determinação do ângulo zenital solar no momento da aquisição (Z) foi obtida a partir do cosseno da diferença entre o ângulo zenital (90°) com o ângulo de elevação solar (*SUN_ELEVATION*) e este último pode ser encontrado nos metadados de cada imagem. A Tabela 3, apresenta os valores utilizados para os anos de estudo.

Tabela 3: Valores utilizados para determinar o ângulo zenital no momento da aquisição (Z)

Ângulo Zenital	2003		2011		
	Ângulo Solar	Cos (Z)	Ângulo Zenital	Ângulo Solar	Cos (Z)
90	46,854746	0,729622	90	60,604261	0,871250

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

A imagem de reflectância monocromático resultado deste processo apresenta valores físicos que serão utilizados na determinação do índice de vegetação NDVI proposto por Rouse *et. al* (1973) conforme observado à equação abaixo.

$$NDVI = \left(\frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \right) \quad (15)$$

Onde:

ρ_{IV} : valor da reflectância na faixa do infravermelho próximo e ρ_V : valor da reflectância na faixa do vermelho da região espectral do visível.

O cálculo do índice NDVI para os anos de 2003 e 2011 foi desenvolvido no *software* SPRING e nele foi elaborada uma rotina em programação Legal, conforme observado nas Figuras 10 e 11. No Apêndice A encontra-se o algoritmo completo destes programas.

Figura 10: Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2003.

```

1  {
2  // Programa em LEGAL
3  //ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE 2003
4  // Declaração de variáveis:
5  Imagem B32003 ("CAT_2003");
6  Imagem B42003 ("CAT_2003");
7  Numerico B3reflecA ("NDVI_2003");
8  Numerico B4reflecA ("NDVI_2003");
9  Numerico NDVIreflecA ("NDVI_2003");
10 //Instanciações de variáveis:
11 B32003= Recuperar (Nome = "L5_B3_REC");
12 B42003= Recuperar (Nome = "L5_B4_REC");
13 pi=3.1415926;
14 cosz= 0.729622387;
15 dr= 1.032928592;
16 lmin3=-1.17;
17 lmax3=264;
18 lmin4=-1.51;
19 lmax4=221;
20 e3=1536;
21 e4=1031;
22 ndmax=255;

```

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Figura 11: Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2011.

```

1  {
2  // Programa em LEGAL
3  //ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE 2011
4  // Declaração de variáveis:
5  Imagem B32011 ("CAT_2011");
6  Imagem B42011 ("CAT_2011");
7  Numerico B3reflecA ("NDVI_2011");
8  Numerico B4reflecA ("NDVI_2011");
9  Numerico NDVIreflecA ("NDVI_2011");
10 //Instanciações de variáveis:
11 B32011= Recuperar (Nome = "L5_B3_REC");
12 B42011= Recuperar (Nome = "L5_B4_REC");
13 pi=3.1415926;
14 cosz= 0.871250323;
15 dr= 1.0329135317;
16 lmin3=-1.17;
17 lmax3=264;
18 lmin4=-1.51;
19 lmax4=221;
20 e3=1536;
21 e4=1031;
22 ndmax=255;

```

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Para o cálculo do NDVI para as imagens do satélite LandSAT 8 sensor OLI foram consideradas as informações e os procedimentos disponibilizados pelo site do USGS. Este sensor é caracterizado por apresentar bandas espectrais com resolução radiométrica de 16 bits e as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo correspondente as bandas B4 e B5, respectivamente. De acordo com as informações fornecidas pelo *United States Geological Survey (USGS)* é necessária a conversão dos valores de número digital para reflectância do Topo da Atmosfera (TOA), sendo possível a partir da aplicação da equação abaixo.

$$\rho\lambda' = M\rho Qcal + A\rho \quad (16)$$

Onde:

$\rho\lambda'$ = TOA reflectância planetária sem correção do ângulo solar; $M\rho$: Banda específica multiplicativa de reflectância; $A\rho$ = Banda específica aditiva e $Qcal$: Quantização e calibração dos valores de pixel (DN).

Os valores considerados para esses parâmetros estão disponibilizados no metadados da imagem e podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros para o cálculo do TOA.

Parâmetros	2016	
	Vermelho	Infravermelho Próximo
$M\rho$	2.0000E-05	2.0000E-05
$Qcal$	Banda 4	Banda 5
$A\rho$	-0.100000	-0.100000

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O resultado obtido para a reflectância planetária ($\rho\lambda'$) é influenciado por fatores externos como o ângulo do sol, dessa forma torna-se necessária a realização de uma correção com o objetivo de se obter a reflectância do TOA ajustada, sendo possível a partir do uso da seguinte equação.

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{sz})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{se})} \quad (17)$$

Onde:

$\rho\lambda'$ = TOA reflectância planetária; θ_{se} = Ângulo de elevação solar e θ_{sz} = Ângulo zenital solar.

O ângulo de elevação do sol ($SUN_ELEVATION$) para este ano de estudo foi de 52,20554657 considerando o valor do seno tem-se: 0,790214241. A partir desta correção foi possível calcular o índice NDVI, conforme descrito no algoritmo abaixo.

Figura 12: Rotina em programação Legal desenvolvida para o ano de 2016.

```

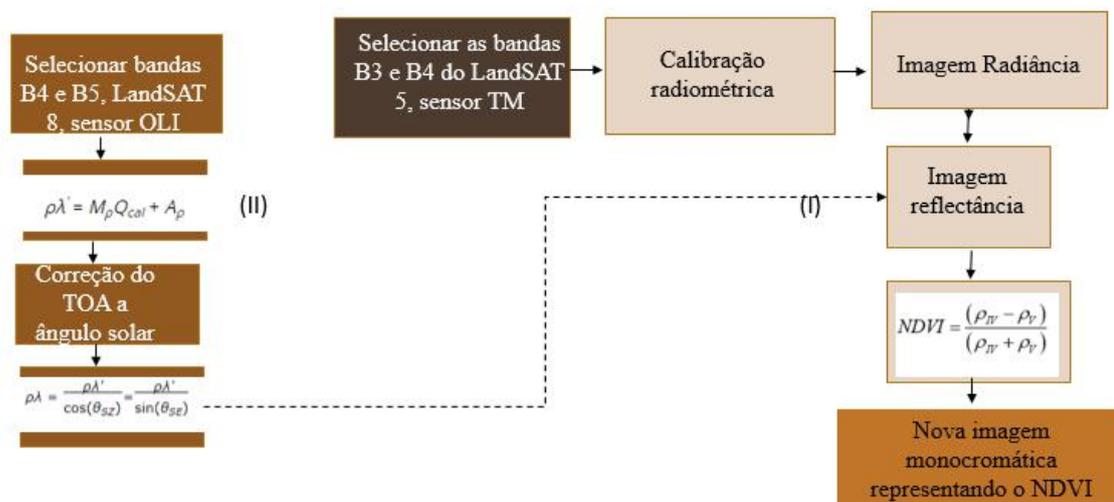
1  {
2  // Programa em LEGAL
3  //ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE 2016
4  // Classif Sup ANTIGA e 2014
5
6  // Declaração de variáveis:
7  Imagem B42016 ("CAT_2016");
8  Imagem B52016 ("CAT_2016");
9  Numerico B4reflecA ("NDVI_2016");
10 Numerico B5reflecA ("NDVI_2016");
11 Numerico NDVIreflecA ("NDVI_2016");
12 //Instanciações de variáveis:
13 B42016= Recuperar (Nome = "B4_REC");
14 B52016= Recuperar (Nome = "B5_REC");
15 RMB4= 0.00002;
16 RAB= -0.1;
17 RMB5= 0.00002;
18 RAB5=-0.1;
19 senose=0.790214341;

```

Fonte: elaborado pela autora, 2017.

A figura 13, abaixo descreve resumidamente os procedimentos adotados para cálculo do índice NDVI para as imagens dos satélites LandSAT 5, sensor TM (I) e LandSAT 8, sensor OLI (II).

Figura 13: Fluxograma para determinação dos procedimentos de cálculo do NDVI



Fonte: elaborado pela autora, 2017.

4.2.2.2 Índice de Vegetação Ajustada ao Solo (SAVI)

O cálculo do índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) proposto por Huete (1988) foi aplicado nas imagens de satélite LandSAT 5, sensor TM e LandSAT 8, sensor OLI. Foi considerado o fator de ajuste L igual a 0,5 com o objetivo de amenizar os efeitos do solo. Por ser um índice que depende dos procedimentos do NDVI, o seu cálculo não apresentou variabilidade na criação do algoritmo para os diferentes sensores em uso. A Figura 14 descreve a rotina desenvolvida para a obtenção deste índice SAVI para os anos em estudo.

Figura 14: Programação desenvolvida em ambiente Legal para o cálculo do SAVI correspondente aos anos de 2003, 2011 e 2016, respectivamente.

```

1  {
2  // Programa em LEGAL
3  //ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO - SAVI ANO DE 2003
4  // Declaração de variáveis:
5  Imagem B32003 ("CAT_2003");
6  Imagem B42003 ("CAT_2003");
7  Numerico B3reflecA ("SAVI_2003");
8  Numerico B4reflecA ("SAVI_2003");
9  Numerico SAVIreflecA ("SAVI_2003");
10 //Instanciações de variáveis:
11 B32003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B3_REC");
12 B42003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B4_REC");
13 //Operações:
14 SAVIreflecA = Novo (Nome= "2003_SAVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30, Escala=150000, Min= -1, Max=1);
15 //Calculo do SAVI:
16 SAVIreflecA = Numerico
17 ((B42003 - B32003)*1.5)/(B42003 + B32003 +0.5);
18 }
1  {
2  // Programa em LEGAL
3  //ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO - SAVI ANO DE 2011
4  // Declaração de variáveis:
5  Imagem B32011 ("CAT_2011");
6  Imagem B42011 ("CAT_2011");
7  Numerico B3reflecA ("SAVI_2011");
8  Numerico B4reflecA ("SAVI_2011");
9  Numerico SAVIreflecA ("SAVI_2011");
10 //Instanciações de variáveis:
11 B32011= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B3_11_REC");
12 B42011= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B4_11_REC");
13 //Operações:
14 SAVIreflecA = Novo (Nome= "2011_SAVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30, Escala=150000, Min= -1, Max=1);
15 //Calculo do SAVI:
16 SAVIreflecA = Numerico
17 ((B42011 - B32011)*1.5)/(B42011 + B32011 +0.5);
18 }

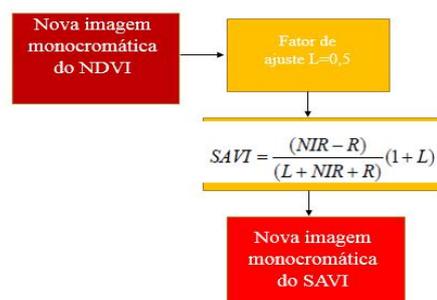
5  // Declaração de variáveis:
6  Imagem B42016 ("CAT_2016");
7  Imagem B52016 ("CAT_2016");
8  Numerico B4reflecA ("NDVI_2016");
9  Numerico B5reflecA ("NDVI_2016");
10 Numerico NDVIreflecA ("NDVI_2016");
11 //Instanciações de variáveis:
12 B42016= Recuperar (Nome = "B4_REC");
13 B52016= Recuperar (Nome = "B5_REC");
14 RMB4= 0.00002;
15 RAB= -0.1;
16 RMB5= 0.00002;
17 RAB5=-0.1;
18 senose=0.790214341;
19

```

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A figura 15, apresenta o fluxograma desenvolvido para o cálculo do SAVI para as imagens dos satélites LandSAT 5, sensor TM e LandSAT 8, sensor OLI.

Figura 15: Fluxograma para determinação do cálculo do SAVI



Fonte: elaborado pela autora, 2017.

4.2.2.3 Detecção de Perda de Vegetação

CRÓSTA (1993) e MOREIRA (2003) propõem uma técnica para mapear as áreas em que houve perdas de vegetação. Este procedimento é baseado na utilização das estatísticas de grades (média e variância) dos dados resultantes das imagens geradas pelo índice NDVI, conforme se observa na tabela 5.

Tabela 5: Dados estatísticos resultantes das imagens geradas pelo índice NDVI

Dia	Média (M)	Variância (V)
07/08/2003	0.217115	0.0115578
29/08/2011	0.210956	0.0105406
10/08/2016	0.264305	0.0161167

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Com os valores da média e variância obtidos a partir das imagens resultantes do índice NDVI foi possível calcular o valor do Ganho e Offset. O objetivo de determinar o estes parâmetros é tornar os níveis de reflectância da imagem mais recente coincidente com os da imagem mais antiga. Neste sentido alguns procedimentos foram adotados. Inicialmente para o cálculo do Ganho foram definidas relações entre os anos de 2003-2011 e 2011-2016, conforme observado a equação abaixo.

$$Ganho = \left(\frac{V_{2003}}{V_{2011}} \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$Ganho = \left(\frac{V_{2011}}{V_{2016}} \right)^{1/2}$$

Onde:

V₂₀₀₃, V₂₀₁₁ e V₂₀₁₆ correspondem à variância para o ano de 2003, 2011 e 2016, respectivamente.

Os resultados obtidos foram utilizados para determinar o valor do Offset a partir da equação demonstrada abaixo.

$$Offset = M_{2011} - (Ganho \times M_{2016})$$

$$Offset = M_{2003} - (Ganho \times M_{2011}) \quad (19)$$

Onde:

M₂₀₀₃, M₂₀₁₁ e M₂₀₁₆ representam os valores da média para os respectivos anos.

Determinados os valores do Ganho e do Offset, as imagens mais recentes foram ajustadas de forma a coincidir com os valores da média e variância das mais antigas, de acordo com a seguinte relação:

$$\begin{aligned} NDVI_2011_Igual &= Ganho \times NDVI_2011 + Offset \\ NDVI_2016_Igual &= Ganho \times NDVI_2016 + Offset \end{aligned} \quad (20)$$

O resultado obtido será uma nova imagem NDVI, e esta, será utilizada para encontrar o valor da perda de vegetação, conforme a equação abaixo.

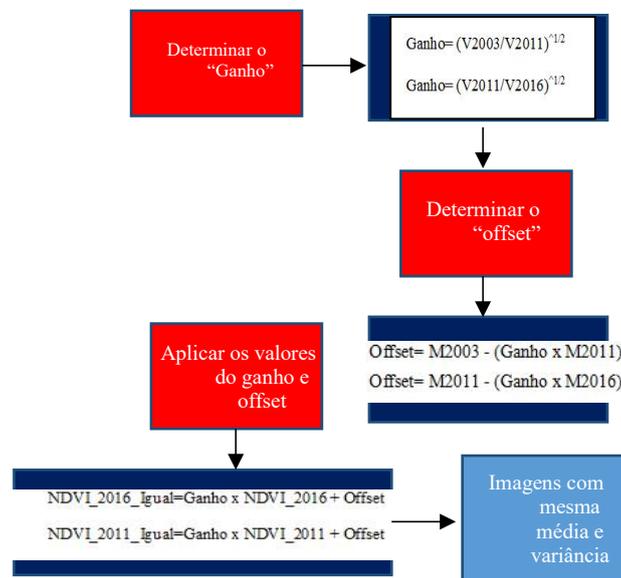
$$C = Ganho \times (A / B) + Offset \quad (21)$$

Em que:

A e B correspondem a imagem NDVI mais antiga e a nova imagem NDVI gerada, respectivamente.

A figura 16 representa o organograma dos procedimentos adotados para a determinação das perdas de vegetação.

Figura 16: Fluxograma do procedimento de perda de vegetação



Fonte: elaborado pela autora, 2017.

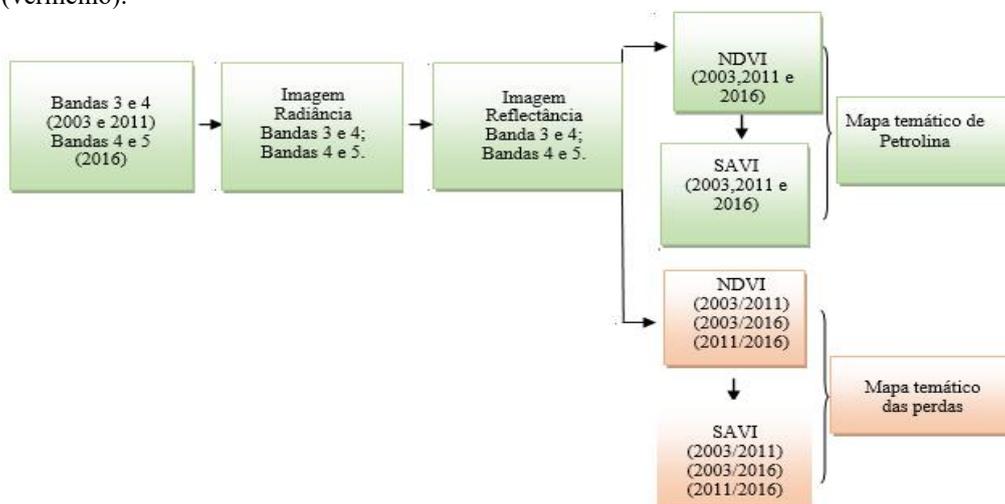
4.2.2.4 Elaboração do Mapa Temático para análise das condições ambientais do município de Petrolina-PE

Analisar as alterações da cobertura vegetal é um fator importante, pois permite acompanhar os setores que contribuem para esta modificação. Bertrand (1971) define que a paisagem é caracterizada pela relação entre os elementos geográficos (relevo, clima, solo) com os diferentes agentes (físicos, biológicos e o antrópico) e estes, por sua vez, podem atuar nas modificações da dinâmica do ambiente. Assim a paisagem pode ser considerada como o reflexo da sociedade ali predominante, ou seja, os meios socioculturais e econômicos, associados às condições climáticas e geológicas são fatores que contribuem na sua caracterização (BERTRAND, 1971).

Neste contexto, mapear as mudanças ocorridas ao longo do tempo torna-se uma alternativa na compreensão das diferentes respostas espectrais que os alvos apresentam quando estão sobre a superfície terrestre. Esta compreensão é possível utilizando-se a cartografia, que “é a ciência da representação e do estudo da distribuição espacial dos fenômenos naturais e sociais, suas relações e suas transformações ao longo do tempo, por meio de representações cartográficas” (LUNKES e MARTINS, 2009, p. 5).

Assim, para compreender os resultados fornecidos pelos índices NDVI e SAVI serão elaborados mapas temáticos que permitirão analisar a dinâmica e as modificações do bioma, assim como as influências da cultura irrigada para os anos em estudo. A Figura 17 apresenta o organograma dos procedimentos adotados até a elaboração dos mapas temáticos.

Figura 17: Fluxograma dos métodos adotados para a criação do mapa temático representando a variação temporal do município (verde) e as perdas ocorridas durante os anos (vermelho).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o resultado da aplicação do índice NDVI para as imagens referentes aos anos 2003, 2011 e 2016 foram obtidos os valores de mínimo e máximo das estatísticas de grade para cada ano estudado. Conhecer esses valores torna-se necessário por permitir a análise e definição das classes dos intervalos de feições. Na Tabela 6 são apresentados os dados obtidos.

Tabela 6: Dados das estatísticas de grade as imagens resultantes do índice NDVI

Anos	Valor de Mínimo	Valor de Máximo
2003	-1.11442	0.807552
2011	-0.658851	0.799549
2016	-1.07328	0.55584

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

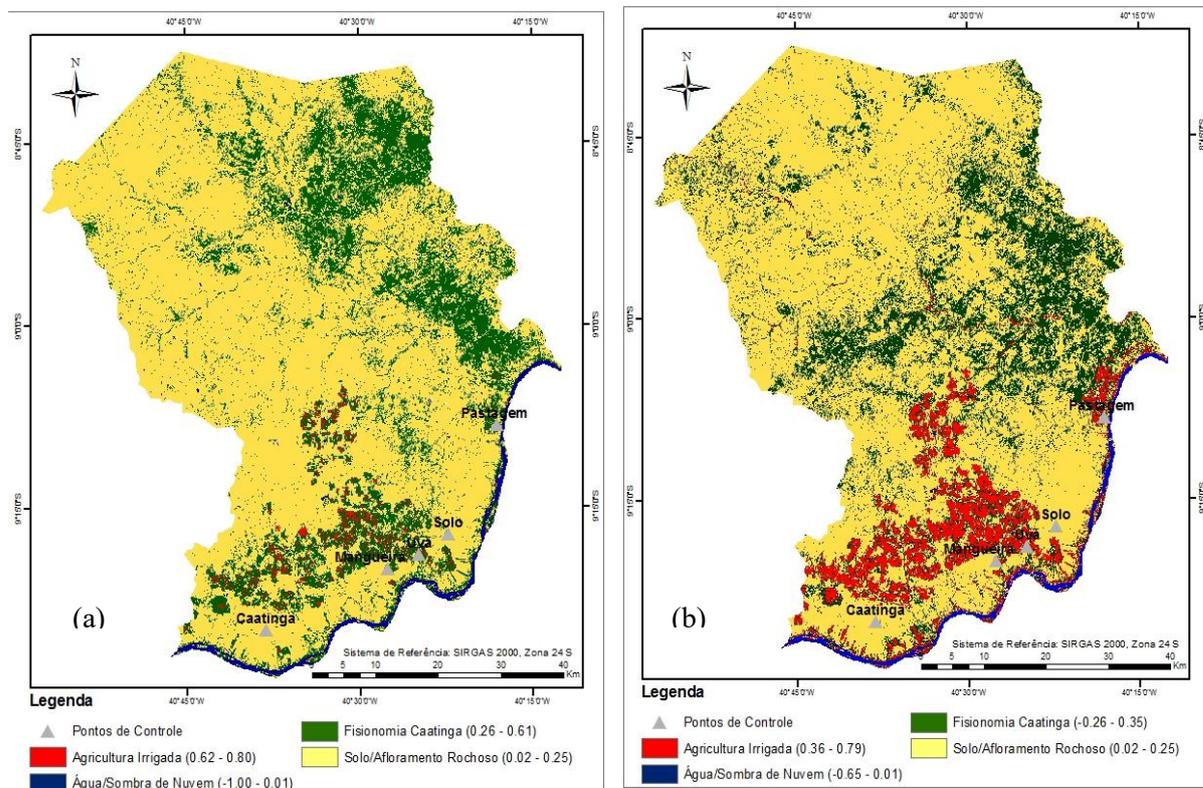
A partir dos valores de máximo e mínimo foram definidos quatro intervalos para as classes de alvos a serem analisados: água ou sombra de nuvem, solo exposto, fisionomia Caatinga e agricultura irrigada. Utilizou-se de coordenadas geográficas para indicar as regiões de caatinga, cultura irrigada, solo, pastagem e corpos hídricos no município de Petrolina. A tabela 7 apresenta as coordenadas geográficas utilizadas como ponto de controle.

Tabela 7: Pontos de controle para determinação das feições

LAT	LONG	COMENTÁRIOS
-9,333597	-40,459078	Mangueira
-9,136915	-40,301112	Pastagem
-9,314867	-40,414117	Uva
-9,416937	-40,635911	Caatinga
-9,286374	-40,372128	Solo
-9,319725	-40,428014	Mangueira irrigada

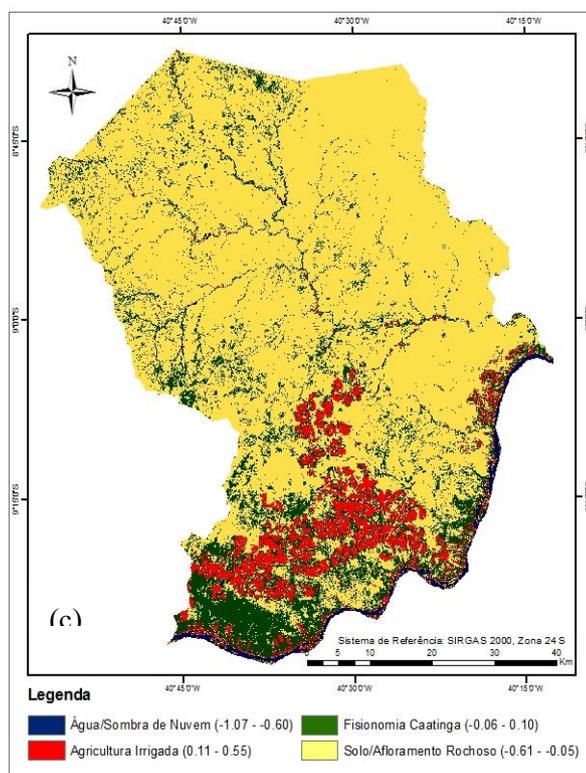
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Figura 18: Mapa temático do Índice NDVI do município de Petrolina para os anos de 2003(A) e 2011 (B).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Figura 19: Mapa temático do Índice NDVI do município de Petrolina para o ano de 2016 (C).



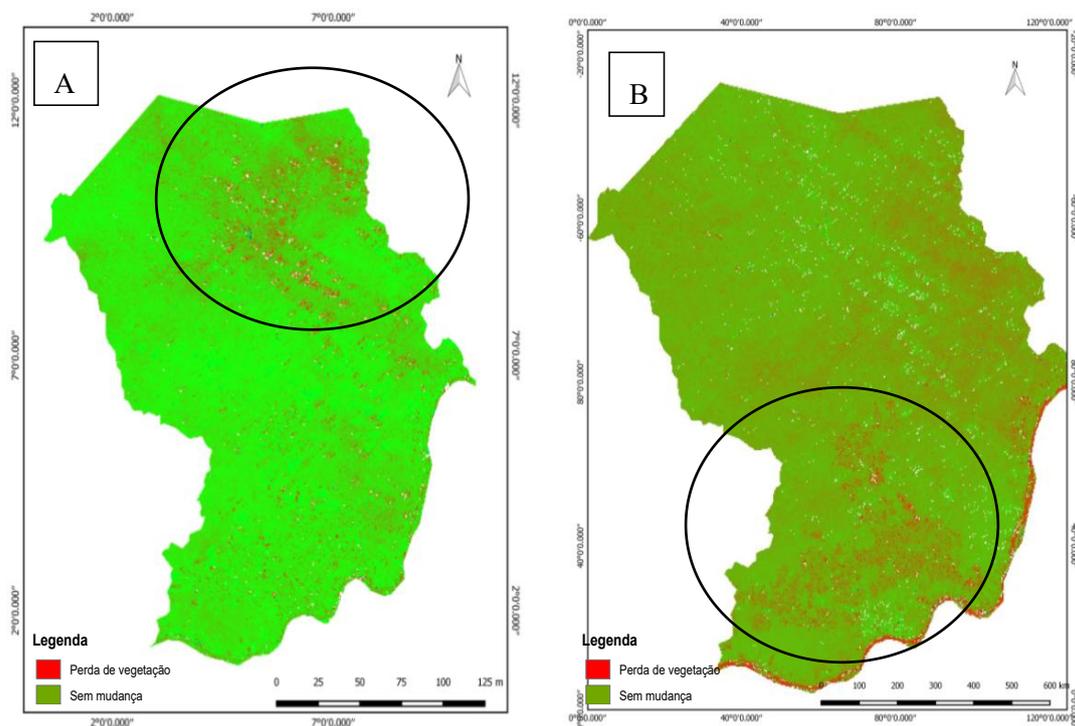
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Analisando os resultados obtidos com o índice NDVI percebe-se que todas as classes apresentaram modificação ao longo do tempo. O alvo da fisionomia Caatinga apresentou uma alteração mais evidente que os demais. Isto pode ser justificado visto que, apesar das imagens em estudo corresponderem ao mês de agosto e compreenderem o período de estiagem deste município, os anos de 2003 e 2011 apresentaram uma precipitação pluviométrica diária para até 10 dias antes da obtenção da imagem de 0,4 e 0,2mm, respectivamente, com uma temperatura média de aproximadamente 25,8°C e 26,01°C respectivamente. Embora este valor possa ser considerado baixo, as respostas espectrais da vegetação Caatinga variam em consequência das suas adaptações para este ambiente de clima semiárido baseado em longos períodos de estiagem e poucos de chuvas. A área do perímetro irrigado também sofre a influência da presença de água e consequente umidade do solo, o que reflete nas respostas espectrais do alvo.

Percebe-se que as classes de: fisionomia caatinga (0,26 - 0,61) e (0,26 - 0,35) e agricultura irrigada (0,62 - 0,80) e (0,36 - 0,79) para os respectivos anos apresentaram valores próximos a 1, o que indica a presença de vegetação densa e de umidade no solo. Na análise do ano de 2016 os valores do índice NDVI para a classe da fisionomia caatinga (-0,06 - 0,10) observa-se que o resultado ficou mais próximo de -1, o que indica uma região com presença de vegetação seca, pouca vegetação ou com presença de solo exposto. O comportamento desta última classe ficou em torno de (-0,61 - -0,05). Ainda de acordo com este mesmo ano a agricultura irrigada, por sua vez, apresentou os valores de seus índices em torno de (0,11 - 0,55), consequência das áreas de irrigação desses polos de produção agrícola. Os dados pluviométricos deste ano demonstraram que para até 10, 30 e 60 dias antes da obtenção da imagem a precipitação diária foi de 0,0mm o que indica um período de estiagem.

Para a análise das áreas de perdas de vegetação foi realizado o cálculo proposto por Crósta (1993) e Moreira (2003). A relação estabelecida para estudo foi entre os anos de 2003 - 2011 (A) e 2011 - 2016 (B). O resultado obtido foi uma nova imagem reflectância monocromática representando as perdas de vegetação e as áreas em que não houve mudanças. Nela foi possível identificar as regiões de modificações a partir da aplicação de técnicas de realce. Freire e Pacheco (2005) destacam que o realce será utilizado com o objetivo de demonstrar as regiões de transformações. Em localidades cujos níveis de cinzas são baixos há um indicativo da não alteração da cobertura vegetal, enquanto que valores altos evidenciam perdas de vegetação. A Figura 20 indica as áreas de modificações dessas regiões nos períodos considerados.

Figuras 20: Perda de vegetação identificada para entre os anos de 2003-2011(A) e 2011-2016(B).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

As áreas apontadas como perda de vegetação (vermelho) indicam que naquela região houve alteração de caráter antrópico e/ou natural. Neste contexto, esta modificação pode ser caracterizada pelas seguintes condições: 1) retirada da cobertura vegetal Caatinga para a introdução de áreas de pastagens, agricultura irrigada e outras aplicações; 2) no manejo e uso do solo durante a fase de maturação da produção agrícola; 3) condições climáticas da região durante o período em estudo enfatizando a presença de solo exposto.

O índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) incorpora um fator de ajuste (L), que atua minimizando os efeitos da reflectância do solo. Para este estudo foi utilizado o $L = 0,5$ no processamento das imagens. Com a aplicação do índice SAVI para as imagens orbitais dos anos de 2003, 2011 e 2016, obteve-se como resultado imagens reflectância monocromática. Foram adquiridos os dados das estatísticas de grades dos valores de máximo e mínimo, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Valores de Mínimo e Máximo para o índice SAVI

Anos	Valor de Mínimo	Valor de Máximo
2003	-1.307692	1.126354
2011	-0.905660	1.118110
2016	-0.514525	0.925574

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Fazendo uso desses valores foi definido um intervalo, considerando como classes para estudos água/sombra de nuvem, solo/afloramento rochoso, fisionomia Caatinga e agricultura irrigada. Embora os intervalos considerados para a classificação das feições dos resultados obtidos com o SAVI tenham apresentado similaridade com as definidas para o NDVI, na análise comparativa da classe de fisionomia Caatinga observou-se (0,25 – 0,50) e (0,28 – 0,60) para o SAVI e (0,26 – 0,61) e (0,26 – 0,35) do NDVI para os anos de 2003 e 2011, respectivamente. Percebe-se que no NDVI há uma maior presença de fisionomia Caatinga do que para o SAVI. Esta diferença ocorre devido ao fator de ajuste considerado para o SAVI, que minimiza os efeitos da reflectância do solo.

Os resultados encontrados para os intervalos do SAVI da classe de agricultura irrigada foram (0,51 – 1,12), (0,61 – 1,12) e (0,54 – 0,92) e do NDVI (0,62 – 0,80), (0,36 – 0,79) e (0,11 – 0,55) para os anos de 2003, 2011 e 2016 respectivamente. Destacou o desenvolvimento da produção agrícola nessas localidades devido a presença de uma vegetação mais densa. Os valores negativos encontrados no SAVI de variação (-1,30 – 0,00), (-0,90 – 0) e (-0,51 – 0,00) para os respectivos anos estão representando a classe da água/ sombra de nuvem, onde se verificou que o SAVI apresentou melhor delimitação destes alvos quando comparado com o NDVI.

A figura 21 apresenta a resposta obtida com a aplicação do índice SAVI. Para melhor verificação das mudanças ocorridas nesse período de tempo, a tabela 9 descreve os dados relativos a essas transformações e o gráfico 3 representa tais alterações.

Figura 21: Mapa temático do Índice SAVI do município de Petrolina para os anos de 2003(A) e 2011(B).

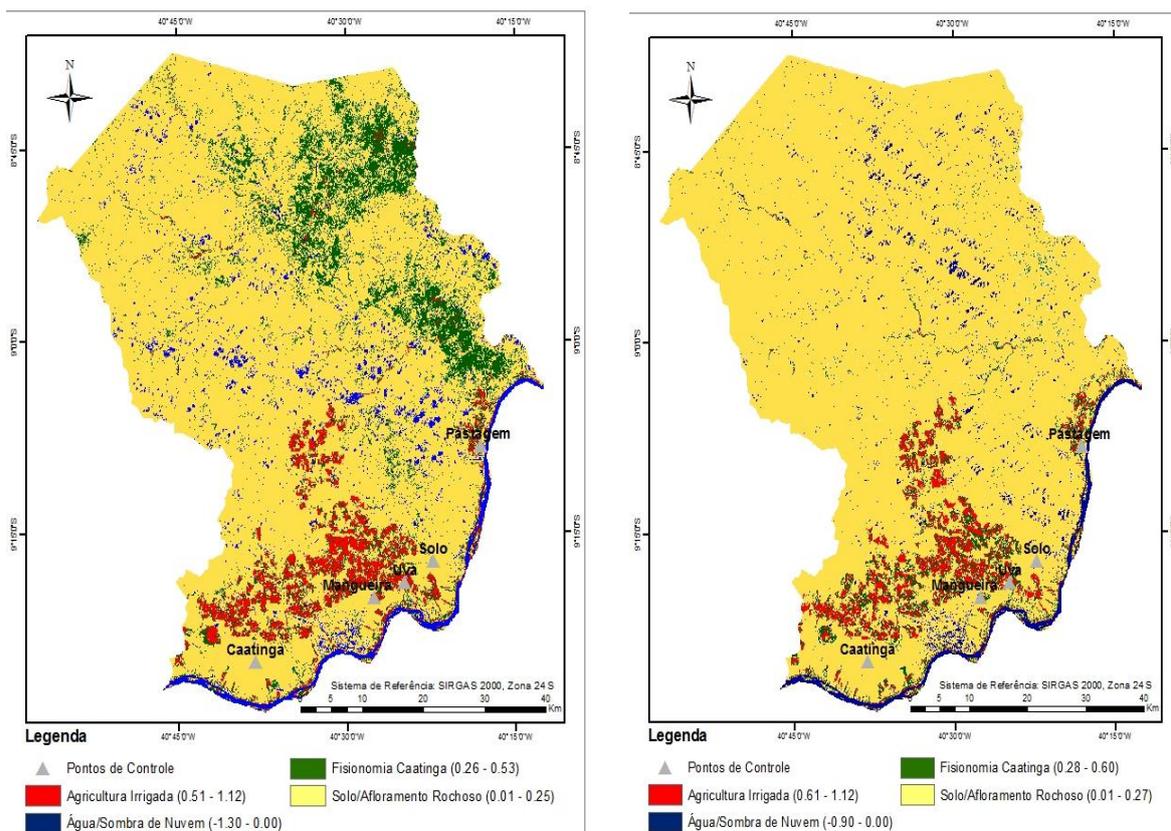
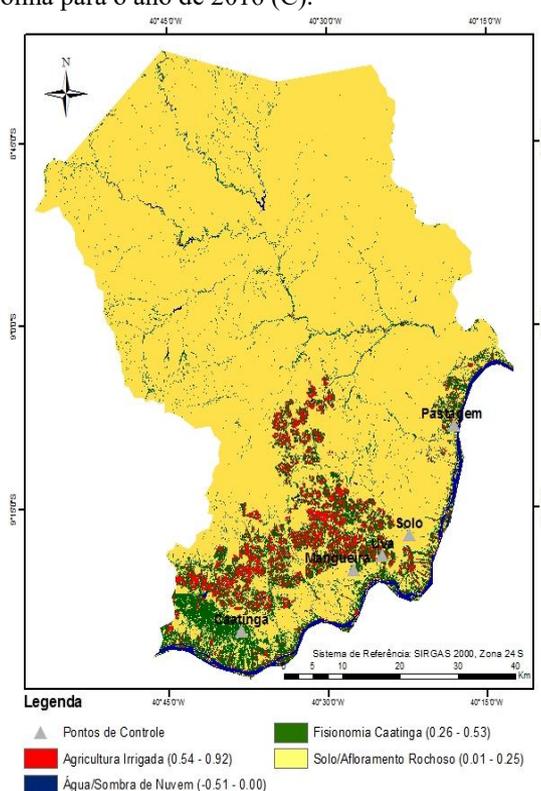


Figura 22: Mapa temático do Índice SAVI do município de Petrolina para o ano de 2016 (C).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Com as classes de feições definidas (água/sombra de nuvem, solo/ afloramento rochoso, fisionomia Caatinga e agricultura irrigada para o estudo do NDVI e do SAVI), foram determinados os valores das medidas de classe. Esses dados foram obtidos para os anos de 2003, 2011 e 2016 e representam a área em km² de cada feição, como observado na Tabela 9 abaixo.

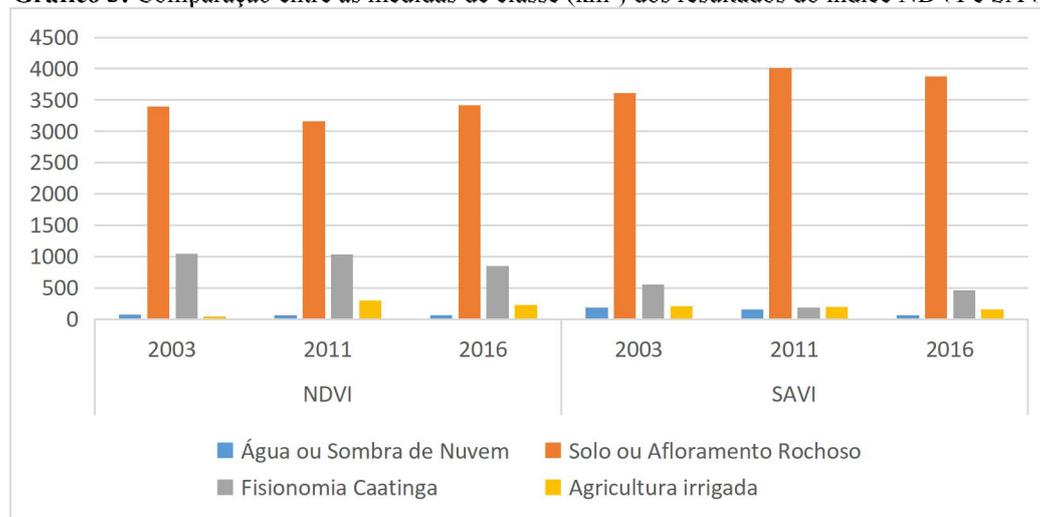
Tabela 9: Medidas de Classe em km² para os anos de 2003, 2011 e 2016.

Classes dos alvos	NDVI			SAVI		
	2003	2011	2016	2003	2011	2016
Água ou Sombra de Nuvem	68,632	60,791	58,328	186,965	151,807	60,634
Solo ou Afloramento Rochoso	3397,207	3162,818	3414,655	3607,281	4008,088	3874,546
Fisionomia Caatinga	1043,631	1032,058	848,552	554,944	189,212	461,608
Agricultura irrigada	46,672	302,168	224,024	204,1398	195,057	150,664

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Percebe-se que houve um aumento gradativo nas áreas das classes definidas para estudo e este resultado justifica-se pelas condições de uso e manejo do solo e da característica da região. Embora considerado um intervalo aproximado nas classes definidas para o índice NDVI e o SAVI, observou-se que os dados apresentaram um comportamento diferente para ambos os índices. O Gráfico 3 apresenta a comparação entre os anos de 2003, 2011 e 2016 dos resultados obtidos com o índice NDVI e SAVI.

Gráfico 3: Comparação entre as medidas de classe (km²) dos resultados do índice NDVI e SAVI



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

6 CONCLUSÕES

Considerando a análise dos índices de vegetação NDVI e SAVI no estudo da dinâmica espectro-temporal e geoespacial do município de Petrolina para os anos de 2003, 2011 e 2016, foi observado que os resultados gerados apresentaram diferenças quanto ao comportamento dos alvos em destaque para a fisionomia Caatinga.

Na comparação dos resultados gerados pelo índice NDVI e SAVI da classe de fisionomia Caatinga, notou-se que, embora os intervalos definidos para estejam aproximados, a resposta espectral apresentou diferenças, ou seja, houve maior presença de vegetação Caatinga nas imagens geradas pelo NDVI do que para o SAVI. Esta alteração pode ser assim explicada: 1) a presença de solo úmido característico dos anos de 2003 e 2011 destacou a vegetação Caatinga; 2) o fator de ajuste considerado para o índice SAVI ($L=0,5$) que atua na minimização dos efeitos do solo contribuiu para superestimar os valores dos índices para melhor identificar a vegetação e o solo; 3) como as imagens orbitais utilizadas no ano de 2016, foram caracterizadas por estarem em uma época de estiagem, isto é, sem presença de chuvas no período 10, 30 e 60 dias, os resultados fornecidos pelo índice NDVI destacaram maior presença de vegetação Caatinga quando comparado ao SAVI. Estes valores, entretanto, estão sujeitos a atuação de efeitos externos como a reflectância do solo.

Neste sentido, conclui-se a importância de escolher um índice que mais se adeque às condições da região de estudo e com o objetivo da pesquisa, pois, como observado, o comportamento espectral de cada alvo apresentará respostas diferentes mediante a aplicação de um índice e da época a ser estudada. Em regiões de Caatinga considera-se o uso do índice SAVI para períodos de seca, pois, este irá reduzir os efeitos da reflectância do solo, que interfere nas respostas da cobertura vegetal. Por sua vez, na presença de chuvas o SAVI pode estimar de maneira inadequada os valores dos índices.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER. **Os domínios morfoclimáticos da América do Sul**. Geomorfologia, 1977, p. 52: 1-21.

ABREU, K. M. P de; COUTINHO, L.M. **Sensoriamento remoto aplicado no estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem**. Revista Vértices, Campos dos Goytacazes/RJ. v.16, n.1, p. 173-196, jan/abr. 2014. DOI: 10.5935/1809-2667.20140012. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20140012/3051>> acesso em: 30 de agosto de 2017.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS (APAC). Disponível no site: <www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio> acesso em: 10 de julho de 2017

AGGARWAL, S; SIVAKUMAR, M.V.K. **Principles of Remote Sensing**. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. Dehra Dun, India, World Meteorological Organization. 2004. p. 23-38.

ALBUQUERQUE, R.H.C de. **Comparação entre metodologia de índices de vegetação utilizando dados do satélite WORLDVIEW-2 no Parque estadual do lago azul, Campo Mourão e Luiziana- PR**. Trabalho de Conclusão de Curso – Campo Mourão 2013.

ALMEIDA, S. A. S. da; FRANÇA, R. S; CUELLAR, M. Z. **Uso e ocupação do solo no Bioma Caatinga do Estado do Rio Grande do Norte**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal – RN, Brasil, 25 a 30 de abril de 2009, p. 5555-5561.

ALMEIDA, T.S; FONTANA, D. C. **Desempenho dos índices de vegetação NDVI e PVI para a cultura da soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril de 2009, INPE, p. 17-22.

ALVES ANDRADE, L.; MARINHO, P. I; TIBURTINO, L. U; BARBOSA, V; REGINA, M. **Análise da Cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, estado da Paraíba**.

CERNE, v. 11, n. 3, julho/setembro, 2005, p. 253-262. Universidade Federal de Lavras, Brasil.

ALVES DE ANDRADE, L; BARBOSA, M. R de V ; PEREIRA, I. M; LEITE, U. T. **Análises da cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, estado da Paraíba.** Revista Científica de América Latina, el Caribe, Espana y Portugal, vol.11, núm. 3, julho/setembro, 2005, pp. 253-262. ISSN: 0104-7760. Disponível em: <http://www.sifloresta.ufv.br/bitstream/handle/123456789/18138/Cerne_v11_n3_p253-262_2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

ALVES, J. J. A; ARAÚJO, M. A de; NASCIMENTO, S. S do. **Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica.** Revista Caatinga, v.22, n.3, p.126-135, 2009. ISSN 1983-125. Disponível em: <<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/560>> acesso em: 17 de agosto de 2017.

ANDRADE, D. D. **Estimativas de carbono na cobertura vegetal da APA Fernão Dias (MG) por meio de dados espectrais de campo.** Caderno de estudos geoambientais (CADEGEO), Vol.05-06, (2014-2015). Disponível em: <<http://www.cadegeo.uff.br/index.php/cadegeo/article/view/22>> Acesso em: 07 de agosto de 2017.

ANDRADE-LIMA, D. 1981. **The Caatinga dominium.** Revista Brasileira de Botânica 4 : 149-163. APNE. 2010. Checklist das Plantas do Nordeste Brasileiro: Angiospermae e Gymnospermae (Versão 1.5). Disponível em: <www.cnip.org.br/bdnpn>. Acesso em janeiro de 2010.

ARAÚJO, S. M. S. de. **A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Questões ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos.** Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE ano 5 n. 5 dezembro de 2011. Disponível em: <http://www.fasete.edu.br/revistarios/media/revistas/2011/a_regiao_semiarida_do_nordeste_do_brasil.pdf> acesso em 20 de setembro de 2017.

BARBOSA, K. M. N do. **Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 131 p., 2006.

BARROS, I. O. B; SOARES, A. A. **Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da caatinga brasileira.** Revista Ciência Agronômica, v. 44, n.1, p.192-198, jan-mar,2013. ISSN 1806-6690. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1565>> acesso em: 12 de agosto de 2017.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain,** Tese (Ph.D.), Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273f., 1995.

BISPO P. C da; VALERIANO, M. M. de; KUPLICH, T. M. **Relação da vegetação de caatinga com a condição geomorfométrica local.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.5, p.523-530, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n5/a10v14n5.pdf>> acesso em: 24 de setembro de 2017.

BRASIL. Ministério da Integração Social. **Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. Nova delimitação do Semiárido Brasileiro.** Brasília: MIN. 2005.

BRASILEIRO, R. S. **Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação.** Scientia Plena, Vol.5, n.5, 2009, ISSN: 055401-1. Disponível em: <<https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/download/629/290>> acesso em: 10 de agosto de 2017.

CALIXTO JÚNIOR, J. T. **Análise estrutural de duas fitofisionomias de caatinga em diferentes em diferentes estados de conservação no semiárido pernambucano.** 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, PB. 95f. 2009.

CARVALHO, F. M. V. de; FERREIRA, L. G. F; LOBO, F.C; DINIZ-FILHO, J. A. F.; BINI, L. M. B. **Padrões de autocorrelação espacial de índices de vegetação MODIS no bioma cerrado.** Revista Árvore, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 279-290, mar./abr. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v32n2/a11v32n2.pdf>> acesso em: 10 de setembro de 2017.

CARVALHO, V. C de; FREITAS, M. W. D. de. **Mapeamento das paisagens em nível de geossistema de três áreas representativas do bioma Caatinga**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21abril 2005, INPE, p.2087-2099

COMPANHIA DESENVOLVIMENTO VALE SÃO FRANCISCO E PARNAÍBA (CODESVASF). Edição 1, p. 412, 2001. Disponível no site: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.19.10.43/doc/18_435.pdf> Acesso em: 29 de agosto de 2017.

CORDEIRO, G. G. **Aspectos gerais sobre salinidade em áreas irrigadas: origem, diagnósticos e recuperação**. Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 1988. Acesso em 20 de julho de 2017.

CORREIA, R. C; ARAÚJO, J. L. P; CAVALCANTI, E. B. de. **A fruticultura como vetor de desenvolvimento: o caso dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA)**. Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 39., 2001, Recife. Acesso em: 29 de agosto de 2017

CORREIA, R. C; OLIVEIRA, C. A. V; NOEL, A. C; ARAÚJO, J. L. P; FRAGA, A. F. **Perfil dos Colonos e sua Relação com a Inadimplência no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho – Petrolina –PE**. Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 37., 1999, Foz do Iguaçu. Anais, Brasília, DF. SOBER, 1999. Acesso em: 28 de agosto de 2017

COSTA, T. C. C. da; ACCIOLY, L. J. O; OLIVEIRA, M.; BURGOS, N.; SILVA, F. **Mapeamento da Fitomassa da Caatinga do Núcleo de Desertificação do Seridó, pelo Índice de Área de Planta (IAP) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), obtido com dados do Sensor Landsat 7 TM**. X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2001, p. 15631573. Acesso em: 12 de outubro de 2017.

COSTA, T. T. C. C; OLIVEIRA, M. A. J. de O; ACCIOLY, L. J. de O; SILVA, F. H. B. B.da S. **Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/ PB)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 961-974, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13s0/v13s0a20.pdf>> acesso em: 17 de novembro de 2017.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. UNICAMP, Instituto de Geociências, Departamento de Metalogênese e Geoquímica, ed. revisada. - Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. 170p

CURRAN, P.J. **Principles of Remote Sensing**. London: Logman Scientific, 1985.260 p.

DEERING, D. W. **Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors**. 1978. 338 f. Dissertation (Ph. D) – Texas A&M University, College Station, TX.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing**. p. 233-242. Clark LabsClark University: EUA, 2003.

EASTMAN, J. R.. Idrisi for Windows. **Manual do usuário**. Trad. HASENACK, H.; WEBER, E. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Recursos Idrisi, Brasil, 1998

EITEN, G. Brazilian Savannas. In: Huntley, B.J. e Walker, B.H. (eds.). **Ecology of tropical savannas. Ecological Studies**, New York, Spring-Verlag. 42: 25, 1982.

EITEN, G. **Classificação da vegetação do Brasil**. Brasília, CNPq, 1983. Cap.5, p.18-19 EMBRAPA, ABC da Agricultura Familiar – Preservação e uso da Caatinga, Brasília, DF, 2007.

EMBRAPA, **Adensamento e compactação de solos irrigáveis da zona semiárida do Nordeste Brasileiro**. Circular Técnica 38, Recife- PE, dezembro de 2007. ISSN 1517-5146. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/856136/adensamento-e-compactacao-de-solos-irrigaveis-da-zona-semi-arida-do-nordeste-brasileiro>> Acesso em: 28 de agosto de 2017.

EIPHANIO, J. C. N; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A. R. **Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. v. 29, n. 3, p. 439-447, mar. 1994. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4073/0>> acesso em: 20 de outubro de 2017.

EIPHANIO, J.C.N; ALMEIDA, A. C.A. de; FORNAGGIO, A. R. **Desenvolvimento do Trigo Avaliado com Dois Índices de Vegetação**. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 19-24.

EIPHANIO, J.C.N; GLERIANI, J. M; FORMAGGIO, A. R; RUDORFF, B. F. T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão.** Pesquisa Agropecuária Brasil, Brasília, v.31, n.6, p. 445-454, jun. 1996. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4503>> acesso em: 17 de novembro de 2017.

FEITOSA, M.V. **Variação temporal do Índice de Vegetação (NDVI) correlacionada ao uso e manejo do solo para a estimativa da erosão.** Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, Dissertação de Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical 2006. 128p.

FERREIRA, J. M. S; FERREIRA, H. S. dos; SILVA, H. A. da; SANTOS, A. M. dos; GALVINCIO, J. D. **Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina - PE** Revista Brasileira de Geografia Física, v.5, n.4, 2012. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/456>> acesso em: 17 de agosto de 2017.

FIELD, C.; BARROS, V. (eds.) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014. p. 1101-1131. ISBN 978-1-107-64165-5.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto.** Apostila, setembro de 2005. Disponível no site <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> Acesso em: 04 de agosto de 2017.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3ª edição ampliada e atualizada. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=18GkH5X81XcC&oi=fnd&pg=PT6&dq=sensoriamento+remoto+e+vegeta%C3%A7%C3%A3o&ots=yIPImOO-8W&sig=5ZFAcCbSHbY9Ff4IvA5qM8J0fhA#v=onepage&q&f=false>> acesso em: 23/08/2017

FONSECA, R.C; FREIRE, N. C. F; SILVA, C. B; JÚNIOR, E. O. R **O Sensoriamento Remoto como instrumento de gestão ambiental no bioma Caatinga: o caso do Parque Nacional de Ubajara.** II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido, Campina Grande, 2017.

FONTANA, D. C; BERLATO, M.A, BERGAMASCHI, H. **Relação entre os índices de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul.**

FREIRE, M.B.G.S dos; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P.A; ALVAREZ, V. H; FREIRE, F. J. **Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas.** Revista brasileira engenharia agrícola ambiental, Campina Grande,v.7 n.2, p.227-232, 2003b. ISSN: 1807-1929.Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662003000200007> Acesso em: 25 de Julho de 2017.

FREIRE, N. C. F. **Desertificação na Região de Xingó: Mapeamento e Análise espectro-temporal.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2004.

FREIRE, N. C.F., PACHECO, A. P. **Aspectos da detecção de áreas de risco à desertificação na região de Xingó.** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, abril 2005, INPE.

FREIRE, N. C.F; PACHECO, A. da P. **Uma abordagem geoespacial e espectro-temporal da degradação ambiental no bioma Caatinga na região de Xingó, Brasil.** Revista Ciência e Trópico. Recife, v.41, n.2, p.97-128, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.fundaj.gov.br/CIC/article/view/1667/1358>> acesso: 20 de outubro de 2017.

GATES, D.M., J.J. Keegan, J.C; Schleter,V.R. **Spectral Properties of Plants, Applied Optics**, 4 (1): 11-20, 1965.

GAUSMANN, H.W., ALLEN, W.A. **Reflectance of Cotton Leaves and this Structure**, Remote Sensing of Environment, 1:110-22, 1969.

HAN, X.; MA, K.; NOORMETS, A; WEI,Y. LIANG, C; GUO,K.; LU,N;CHEN,J; JONH, R. **Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-**

arid region of Inner Mongolia. In: Remote Sensing of Environment, 2008, p.2018-2032.

HAUFF, S. N. **Representatividade do Sistema Nacional de Unidades de Conservação na Caatinga.** Programas de Nações Unidas para o Desenvolvimento Projeto BRA/00/021: Sustentabilidade e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade. Brasília, Setembro, 2010.

HUETE, A.R. **A Soil-adjusted vegetation index (SAVI).** Remote Sensing of Environment, 25:295-309, 1988.

HUETE, A.R., JUSTICE, C. **MODIS Vegetation Index (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document,** Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, <<http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/#vegetation-indices>>, 129 p., 1999.

HUETE, A.R; DIDAN, R; MIURA, T; RODRIGUEZ, E.P; GAO, X. G. Ferreira. **Overview of the radiometric and biophysics performance of the MODIS Vegetation indices,** Remote Sensing of Environment, 83:195-213, 2002.

HUETE, A.R; LIU, H.Q. **An error and sensivity analysis of the atmospheric and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(4):897-905,1994.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação.** Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

JACKSON, R; HUETE, R. **Interpreting vegetation indices.** Preventive veterinery **Medicine.** Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 11 185-2001, 1991.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** Tradução José Carlos Neves Epiphanyo *et. al.* São José dos Campos. SP. Ed. 1, 2009. 244p.ISBN: 97885605070601

KAZMIERCZAK, M. L. **Uso de Dados AVHRR/NOAA GAC para Análise da Sazonalidade da Caatinga.** Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 513-518.

LACERDA, F.F.; SILVA JÚNIOR, H.D.; ASSAD, E.D.; ASSIS, J.M.O.; MOURA, M.S.B. **Extremos e variabilidade climática no nordeste brasileiro e em**

Pernambuco. In: Galvinctio, J.D. (Orga.). Mudanças climáticas e impactos ambientais. EDUFPE: Recife, p.124, 2010.

LACERDA, M. A.D; LACERDA, R. D de. **O Cluster da fruticultura no Pólo Petrolina/Juazeiro.** Revistas de Biologia e Ciências da Terra. v.4, n. 1- 1º semestre 2004. ISSN 1519-5228. Disponível em: <<http://joaootavio.com.br/bioterra/workspace/uploads/artigos/petrolina-5156387caa5d1.pdf>> acesso em: 17 de outubro de 2017.

LEAL, I. G; ACCIOLY, A; NASCIMENTO, C.; FERREIRA, F. L. de. **Fitorremediação de solo salino sódico por atriplex nummularia e gesso de jazida.** Revista Brasileira de Ciência Solo, Viçosa, v.32, p. 1065-1072, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n3/a15v32n3.pdf>> Acesso em: 25 de julho de 2017.

LIMA JÚNIOR, C. de, ACCIOLY, L., GIONGO, V.; LIMA, R. L. F. de A; SAMPAIO, E. V. de Sá B.; MENEZES, R. S. C. **Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação.** Revista Scientia Forestalis, v. 42, n.102, p.289-298, jun.2014. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114649/1/ScientiaForestalis.pdf>> acesso em: 17 de agosto de 2017.

LINS, M.; ALBUQUERQUE, C. **Tecnologias para reduzir a pobreza no semi-árido.** Salvador, BA: UFBA, 2001.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto.** Livro, ed. 2 ampliada, 2006, p. 908. Campo Grande.

LUCCHESI, A. A.; CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Fatores da produção vegetal Ecofisiologia da produção agrícola.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 1-11.

LUETZELBURG, P. V. **Estudos botânicos do Nordeste.** Inspeção Federal de Obras Contra as Secas, Rio de Janeiro, v.3 (Publicação 57. Série I-A). p. 1922-1923.

LUNKES, R. P.; MARTINS, G. **Alfabetização Cartográfica: Um desafio para o ensino da geografia.** São Paulo: Atlas, 2009.

MARCUSSI, A B; BUENO, C. R. P.; MIQUELONI, D. P., ARRAES, C. L. **Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica.** Revista Caminhos de Geografia, v. 11, n. 35, 2010, p. 41-53. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/viewFile/16000/9020>> acesso em: 17 de outubro de 2017.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures.** Lanham, MD: EOSAT, 1986. (Landsat User Notes).

MARKHAM, B.L.; BARKER L.L. (1987). **Thematic mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances.** International Journal of Remote Sensing, v.8, n.3, p.517-523.

MELESSE, A.M. *et. al.* **Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling.** Sensor, v.7, p. 3209-3241, 2007.

MELLO, G. I. C. S.. **Para além do rio: A relação entre o CEFET- PETROLINA e o contexto rural de sequeiro.** Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.de. **"Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto."** Embrapa Cerrados-Livros técnicos (INFOTECA-E) (2012). Disponível em: < <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>> Acesso em: 20 de julho de 2017.

MENEZES R. S.C.; SIMÕES, D.A.; SAMPAIO, E.V.S.B. **A Palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual de novas perspectivas de uso.** UFPE. p.105-128, 2005.

MONTEIRO, T. R. R. **Uso dos solos, índices de vegetação e degradação na APA das onças-PB.** Dissertação Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFPB, 2013.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** Viçosa: Ed. UFV, 320p, 2005.

MOURA, D. C.; MELO, J. I. M. de; SCHLINDWEIN, C. **Visitantes Florais de Boraginaceae A. Juss. no Baixo Curso do Rio São Francisco: Alagoas e Sergipe.** Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v.5, supl.1, p. 285-287. Disponível em:<

<http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/309/270>> acesso em: 10 de agosto de 2017.

MYERS, V.I., 1970. **Soil, Water and Plant Relations. Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry**, Washington: National Academy of Sciences, 253 -297.

NOVO, E.M. L. Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. Edição revista 4. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 388p.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; JARENKOV, J. A.; RODAL, M. J. N. **Floristic relationships of seasonally dry forests of eastern South America based on tree species distribution pattern**. Neotropical savannas and seasonally dry forests. Boca Raton (EUA): CRC Press, p. 159-190, 2006.

PEREZ-MARIN, A. M.; CÉSAR, R. S.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. de. **Efeito da Gliricidia sepium sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no agreste paraibano**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.30, n.3, p.555-564, maio/jun. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v30n3/31220.pdf>> acesso em: 17 de julho de 2017.

Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília, v.33, n.8, p1399-1405, ago. 1998.

PETERSON, D.L.; RUNNING, S. W. **Applications in Forest Science and Management in Theory and Applications of Optical Remote Sensing**, NY: John Wiley, 4210-4273, 1989.

PONZONI, F. J; MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. **Comportamento Espectral da Vegetação: Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001

PONZONI, F. J; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos- SP: 2007. Editora Parêntese. Ed. 1, p. 144, 2007.

QI, J. C.; MORAN, M.S. **Biophysical Parameter Estimations Using Multidirectional Spectral Measurements**, Remote Sensing of Environmental, 54:71-83, 1995.

RÊGO, S. C. A.; LIMA, P. P.S.; LIMA, M. N. S.; MONTEIRO, T. R. R.. **Análise Comparativa dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI no município de São**

Domingos do Cariri-PB. Revista GEONORTE, edição especial, v. 2, n.4, p. 1207 - 1229,2012. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/2738697-Analise-comparativa-dos-indices-de-vegetacao-ndvi-e-savi-no-municipio-de-sao-domingos-do-cariri-pb.html>> acesso em: 20 de setembro de 2017.

RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. **Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data).** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.43, n.12. p.1541-1542, Dec.1977.

RODAL, M.J. N.. **Fitossociologia da vegetação arbustivo-arbórea em quatro áreas de caatinga em Pernambuco.** Tese de Doutorado. UNICAMP, Campina, 2012.

ROSA, R. S.; MENEZES, N. A.; COSTA, W.J.E.M; GROTH, BRITSKI, H. A. **Diversidade, padrões de distribuição e conservação dos peixes da Caatinga.** Editora universitária UFPE, p. 3-74. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Naercio_Menezes/publication/234138122_Diversidade_padroes_de_distribuicao_e_conservacao_dos_peixes_da_Caatinga/links/00b4952cfe6c014402000000/Diversidade-padroes-de-distribuicao-e-conservacao-dos-peixes-da-Caatinga.pdf> acesso em: 17 de novembro de 2017.

ROSENDO, J. S. dos. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do rio Araguari – MG – Utilizando dados do sensor Modis.** Dissertação de mestrado, programa de Pós-graduação em Geografia. Uberlândia – MG, 2005.

ROUSE, J. W., R. H., Haas, J. A., Shell, D.W., Deering and J.C., Harlan, 1974. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation.** Final Report, Type III, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 371 pp.

SAMPAIO, E. V.S.B.; ARAÚJO, M. do S. B.; SAMPAIO, YONY, S.B. **Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil.** Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 22, nº 1, jan/jun. 2005. Disponível em: < <http://www.revista.ufpe.br/revistageografia/index.php/revista/article/view/38/8>> Acessado em 14 de agosto de 2017.

SAMPAIO, E; V. S. B; SAMPAIO, Y. S. B.; VITAL, T.; ARAÚJO, SOCORRO, B; SAMPAIO, G. R. **Desertificação no Brasil: Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência.** Editora Universitária UFPE, 2003. 202p

SILVA, D. F. da; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H. R. R. C. A. **Variabilidade da Qualidade de Água na bacia hidrográfica do rio São Francisco e atividades antrópicas relacionadas.** Revista Eletrônica ISSN 1677-4280 Vol.1No 3, 2010. Disponível em <<http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/view/687>>

SILVA, E. T. J. B. **Utilização dos índices de Vegetação do Sensor MODIS para Detecção de Desmatamentos no Cerrado: Investigação de Parâmetros e Estratégias.** 2004, 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004

SILVA, F. B. da; OLIVEIRA, C.W.; NESS, R. L. L.; ARAÚJO, R. S.; ARAÚJO, G. P. de; SILVA, V. **Determinação do índice de área foliar (IAF) e do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na chapada do Araripe através de imagens de satélite (LandSAT 5 TM), diferentes anos, na estação seca.** VI Encontro Nacional da Anapas, 18-21 de setembro de 2012, Belém –PA –Brasil. Acesso em: 17 de novembro de 2017.

SILVA, J. da; HAMULAK, T. M; RIBEIRO, S. R. A. **Índice de vegetação (NDVI) para identificação de áreas de reflorestamento.** Anais Semana de Geografia, v. 1, n. 1, Ponta Grossa. UEPG, 2012. ISSN 2317-9759. Acesso em: 17 de novembro de 2017.

SILVA, J. M. C. da; TABARELLI, M.; LINS, M. T. F. da. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente: Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

SILVA, M. T; SILVA, V. P. R., SOUZA, E. P; AZEVEDO, J. **Estimativa da erosividade das chuvas na estação agrometeorológica de Bebedouro (PE).** Ed. 1a., editora da Universidade Federal de Campina Grande - EDUFCG. DOI: 10.13140/RG.2.1.3516.3766, pp. 325-339. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Madson_Silva/publication/303936473_EROSIVITY_ESTIMATION_OF_RAINFALL_IN_THE_WEATHER_STATION_OF_BEBEDOURO_PE/links/5762be1008ae2a00c8bb0367/EROSIVITY-ESTIMATION-OF-

RAINFALL-IN-THE-WEATHER-STATION-OF-BEBEDOURO-PE.pdf> acesso em: 10 de agosto de 2017.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/referencias/tese_britaldo/capit1.pdf> Acessado em 28 de julho de 2017.

SOUZA, A. dos S.; LUCENA, R. F. P. de; ALBUQUERQUE, M. B.; FABRICANTE, J. R. **Status da vegetação de caatinga após a implantação das obras de integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Revista Gaia Scientia, 2014. V. 8. ISSN: 1981-1268. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Juliano_Fabricante3/publication/259892955_Status_da_Vegetacao_de_Caatinga_Apos_a_Implantacao_das_Obras_de_Integracao_do_Rio_Sao_Francisco_com_Bacias_Hidrograficas_do_Nordeste_Setentrional/links/0046352e71b51cd34f000000/Status-da-Vegetacao-de-Caatinga-Apos-a-Implantacao-das-Obras-de-Integracao-do-Rio-Sao-Francisco-com-Bacias-Hidrograficas-do-Nordeste-Setentrional.pdf> acesso em: 20 de outubro de 2017.

STEFFEN, C.A. **Fundamentos de radiometria**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, 1996, p.1-17. INPE.

SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FARIA, V. G. C. de. **Avaliação de três métodos de estimativas de índice de área foliar aplicados à cana-de-açúcar**. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril de 2009, INPE, p.499-506.

TAURA, T. A.; ALVAREZ, I. A.; SÁ, I. B.; PEREIRA, L. A.; SANTOS, S. M.. **Sensoriamento Remoto na análise da expansão do uso e ocupação do solo em Petrolina-PE**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE, 2011.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro, IBGE, 1991. 124p.

WANG, Q., ADIKU, S., TENHUNEN, J.; GRANIER, A. **On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site.** Remote Sensing of Environment, 94:244-255, 2005.

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

APÊNDICE A

ALGORITMOS EM PROGRAMAÇÃO LEGAL DOS ÍNDICES NDVI E SAVI

```
{  
// Programa em LEGAL  
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE  
  2003  
// Declaração de variáveis:  
Imagem B32003 ("CAT_2003");  
Imagem B42003 ("CAT_2003");  
Numerico B3reflecA ("NDVI_2003");
```

```

Numerico B4reflecA ("NDVI_2003");
Numerico NDVIreflec ("NDVI_2003");
//Instanciações de variáveis:
B32003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B3_REC");
B42003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B4_REC");
pi=3.1415926;
cosz= 0.729622387;
dr= 1.032928592;
lmin3=-1.17;
lmax3=264;
lmin4=-1.51;
lmax4=221;
e3=1536;
e4=1031;
ndmax=255;
//Operações:
B3reflecA = Novo (Nome= "2003_B3_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
Escala=150000);
B4reflecA = Novo (Nome= "2003_B4_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
Escala=150000);
NDVIreflecA = Novo (Nome= "2003_NDVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
Escala=150000, Min= -1, Max=1);
//Conversao ND para reflectancia
B3reflecA = Numerico
((((((lmax3-lmin3)/ndmax)*B32003)+lmin3)*pi)/(e3*cosz*dr));
B4reflecA = Numerico
((((((lmax4-lmin4)/ndmax)*B42003)+lmin4)*pi)/(e4*cosz*dr));
//Cálculo final NDVI com reflectancia e correcao elevacao do sol
NDVIreflecA = ((B4reflecA -B3reflecA)/(B4reflecA +B3reflecA));

{
// Programa em LEGAL
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE
2011

// Declaração de variáveis:
Imagem B32011 ("CAT_TM_2011");
Imagem B42011 ("CAT_TM_2011");
Numerico B3reflec ("NDVI_2011");
Numerico B4reflec ("NDVI_2011");
Numerico NDVIreflec ("NDVI_2011");
//Instanciações de variáveis:
B32011= Recuperar (Nome = "2011_B3");
B42011= Recuperar (Nome = "2011_B4");
pi= 3.1415926;
cosz= 0.812503944;
dr= 1.0032864253;
lmin3= -1.17;
lmax= 264;
lmin4=-1.51;

```

```

lmax4= 221;
e3=1536;
e4=1031;
ndmax=255;
//Operações:
B3reflec = Novo (Nome= "2011_B3_REFLEC", ResX =30, ResY=30, Escala=150000);
B4reflec = Novo (Nome= "2011_B4_REFLEC", ResX =30, ResY=30, Escala=150000);
NDVIreflec = Novo (Nome= "2011_NDVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000, Min= -1, Max=1);
//Conversao ND para reflectancia:
B3reflec = Numerico
((((lmax3-lmin3)/ndmax)*B32011+ lmin3)*pi)/(e3*cosz*dr));
B4reflec = Numerico
((((lmax4-lmin4)/ndmax)*B42011+ lmin4)*pi)/(e4*cosz*dr));
//Cálculo final NDVI
NDVIreflec = ((B4reflec -B3reflec)/(B4reflec +B3reflec));
    }

{
// Programa em LEGAL
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA - NDVI ANO DE
    2016
// Declaração de variáveis:
Imagem B42016 ("CAT_2016");
Imagem B52016 ("CAT_2016");
Numerico B4reflecA ("NDVI_2016");
Numerico B5reflecA ("NDVI_2016");
Numerico NDVIreflec ("NDVI_2016");
//Instanciações de variáveis:
B42016= Recuperar (Nome = "L8_B4_REC");
B52016= Recuperar (Nome = " L8_B5_REC ");
RMB4= 0.00002;
RAB4= -0.1;
RMB5= 0.00002;
RAB5= -0.1;
senose = 0.7902143416974;
//Operações:
B4reflecA = Novo (Nome= "2016_B4_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000);
B5reflecA = Novo (Nome= "2016_B5_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000);
NDVIreflecA = Novo (Nome= "2016_NDVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000, Min= -1, Max=1);
//Conversao ND para reflectancia
B4reflecA = Numerico
(((RMB4 * B42016) + (RAB4)) / (senose));
B5reflecA = Numerico
(((RMB5 * B52016) + (RAB5)) / (senose));
//Cálculo final NDVI com reflectancia e correcao elevacao do sol
NDVIreflecA = ((B5reflecA -B4reflecA)/(B5reflecA +B4reflecA));

```

}

```

{
// Programa em LEGAL
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO - SAVI ANO DE 2003
// Declaração de variáveis:
Imagem B32003 ("CAT_2003");
Imagem B42003 ("CAT_2003");
Numerico B3reflecA ("SAVI_2003");
Numerico B4reflecA ("SAVI_2003");
Numerico SAVIreflecA ("SAVI_2003");
//Instanciações de variáveis:
B32003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B3_REC");
B42003= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B4_REC");
//Operações:
SAVIreflecA = Novo (Nome= "2003_SAVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000, Min= -1, Max=1);
//Cálculo final SAVI
SAVIreflecA = Numerico
(((B42003-B32003) *1.5)/(B42003 +B32003 +0.5));
}

```

```

{
// Programa em LEGAL
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO - SAVI ANO DE 2011
// Declaração de variáveis:
Imagem B32011 ("CAT_2011");
Imagem B42011 ("CAT_2011");
Numerico B3reflecA ("SAVI_2011");
Numerico B4reflecA ("SAVI_2011");
Numerico SAVIreflecA ("SAVI_2011");
//Instanciações de variáveis:
B32011= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B3_REC");
B42011= Recuperar (Nome = "MOSAICO_B4_REC");
//Operações:
SAVIreflecA = Novo (Nome= "2011_SAVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,
    Escala=150000, Min= -1, Max=1);
//Cálculo final SAVI
SAVIreflecA = Numerico
(((B42011-B32011) *1.5)/(B42011 +B32011 +0.5));
}

```

```

{
// Programa em LEGAL
//ÍNDICE DE VEGETAÇÃO AJUSTADO AO SOLO - SAVI ANO DE 2011
// Declaração de variáveis:
Imagem B42016 ("CAT_2016");
Imagem B52016 ("CAT_2016");
Numerico B4reflecA ("SAVI_2016");
Numerico B5reflecA ("SAVI_2016");
Numerico SAVIreflecA ("SAVI_2016");
}

```

```
//Instanciações de variáveis:  
B42016= Recupere (Nome = "MOSAICO_B4_REC");  
B52016= Recupere (Nome = "MOSAICO_B5_REC");  
//Operações:  
SAVIreflecA = Novo (Nome= "2016_SAVI_REFLEC", ResX =30, ResY=30,  
    Escala=150000, Min= -1, Max=1);  
//Cálculo final SAVI  
SAVIreflecA = Numerico  
(((B52016-B42016) *1.5)/(B52016 +B42016 +0.5));  
}
```