UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
IG, IB, IQ, CDS e ECO/FACE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE REVEGETAÇÃO DE UMA ÁREA DESERTIFICADA – JAGUARIBE (CE)

ALICE SOARES DE SANTANA

BRASÍLIA - 2019

ALICE SOARES DE SANTANA

O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE REVEGETAÇÃO DE UMA ÁREA DESERTIFICADA – JAGUARIBE (CE)

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Brasília - 2019

ALICE SOARES DE SANTANA

O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE REVEGETAÇÃO DE UMA ÁREA DESERTIFICADA – JAGUARIBE (CE)

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador)

_____

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e professor, Gustavo Baptista, pela acolhida e por ter abraçado a ideia da pesquisa, desde o princípio, sem hesitar.

Ao professor Pedro Zuchi, que me ensinou a elaborar trabalhos acadêmicos na disciplina preparatória para o TCC, por ele ministrada.

Aos meus chefes durante o estágio no Ministério do Meio Ambiente, Marcos Santana e Valdineide Barbosa, influenciadores especialíssimos na escolha do tema de estudo.

À FUNCEME, em especial Margareth Carvalho e Rousilene Silva, que disponibilizaram as imagens de alta resolução do Projeto Brum analisadas na pesquisa.

À minha mãe, Denise Bogéa, pela torcida e amor incondicional, sem ela nada seria possível.

Ao meu pai, Arão Santana, fonte de admiração e respeito.

À Bianca e Rodrigo, primos que assumem o papel de irmãos, sempre ao meu lado nos momentos mais felizes ou difíceis.

À Francisca e Jerffeson, pela ajuda na realização da pesquisa.

À Heloísa e Paula, amigas que estiveram comigo ao longo da caminhada acadêmica.

E por fim, dedico este trabalho para Aloysio Neto e Djulia Raphaella, por conseguirem me tranquilizar e ajudar a reerguer, quando mais preciso.

RESUMO

O presente trabalho analisou a eficácia do *Projeto de Recuperação de Área Degradada em Processo de Desertificação na Sub-bacia Hidrográfica do Riacho do Brum*, localizado no Município de Jaguaribe (CE) na revegetação da área. Por meio do sensoriamento remoto, obteve-se os dados de NDVI, SAVI e SFDVI da área de estudo, em três períodos distintos – 2012 (pré-intervenção), 2016 (finalização do projeto) e 2019 –, gerados a partir das imagens Quickbird, Pleiades e CBERS. Foram utilizadas informações obtidas com base nos índices de vegetação, visando à realização de uma análise discriminante que teve o intuito de discriminar a área vegetada da área não vegetada, favorecendo, dessa maneira, a verificação da eficácia desse projeto na recuperação da área degradada. Por meio dos gráficos de análise discriminante, tornou-se possível comprovar que a área de intervenção do projeto se diferenciou em relação a cobertura vegetal da área que não recebeu a intervenção, concluindo-se que as técnicas utilizadas foram eficientes.

Palavras-chave: Desertificação; Sensoriamento Remoto; Caatinga; Recuperação de Área Degradada; Análise Discriminante.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obtenção de Imagem por Sensoriamento Remoto ……16
Figura 2 - Campo Instantâneo de Visada / IFOV 17
Figura 3 - Curva de Reflectância Típica de uma Folha Verde 22
Figura 4 - Área de Estudo 28
Figura 5 - Projeto Brum 29
Figura 6 - Mapa de Rios e Curso D'água 32
Figura 7 - Mapa Pedológico do Município de Jaguaribe 36
Figura 8 - Delimitação das Áreas de Estudo 40
Figura 9 - Shape de Pontos Aleatórios Plotados sobre a Área de Estudo 41
Figura 10- Valor do Índice de vegetação no Pixel Selecionado.....50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - SFDVI 25
Gráfico 2 - Ilustração do Gráfico de Análise Discriminante.....26
Gráfico 3 - Análise Discriminante I …….....…….....…….....…….… 52
Gráfico 4 - Análise Discriminante II ….....…….....…….....…….… 54
Gráfico 5 - Análise Discriminante III ….....…….....…….....…. 56

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Estação 36320000 / ANA 33
Imagem 2 - Projeto Brum / Satélite Quickbird 37
Imagem 3 - Projeto Brum / Satélite Pleiades.....38
Imagem 4 - Projeto Brum / Satélite CBERS.....39
Imagem 5 - Quickbird (2012) / NDVI.....43
Imagem 6 - Plêiades (2016) / NDVI.....43
Imagem 7 - CBERS (2019) / NDVI.....44
Imagem 8 - Quickbird (2012) / SAVI.....46
Imagem 9 - Plêiades (2016) / SAVI.....46
Imagem 10 - CBERS (2019) / SAVI.....47
Imagem 11- Quickbird (2012) / SFDVI.....48
Imagem 12 - Plêiades (2016) / SFDVI.....49
Imagem 13 - CBERS (2019) / SFDVI.....49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Imagens do Satélite Quickbird …….....…… 19
Tabela 2 - Imagens da Constelação Pleiade …….....…… 19
Tabela 3 - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres 20
Tabela 4 - CBERS 3 / Câmera Pancromática e Multiespectral 21
Tabela 5 - Classificação Climatológica da Região do Município do Jaguaribe …… 34

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 08

1 BREVE HISTÓRICO ACERCA DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO 10
1.1 Contexto Mundial 10
1.2 Semiárido Brasileiro 12
1.3 Ceará 13

2 SENSORIAMENTO REMOTO 15
2.1 Imagens de Alta Resolução 16
2.1.1 Quickbird 17
2.1.2 Pleiades 18
2.2 Imagens CBERS 19
2.3 Comportamento Espectral 20
2.4 Índices de Vegetação 22
2.4.1 NDVI 22
2.4.2 SAVI 23
2.4.3 SFDVI 23
2.5 Análise Estatística 25

3 MATERIAIS E MÉTODOS 27
3.1 Caracterização da Área de Estudo 27
3.1.1 Localização e Acesso 28
3.1.2 Aspectos Socioeconômicos 29
3.1.3 Aspectos Físicos 29
3.1.3.1 Geologia 30
3.1.3.2 Hidrologia 30
3.1.3.3 Climatologia 32
3.1.3.4 Vegetação 34
3.1.3.5 Solo 34
3.2 Base Metodológica 35
3.3 Aplicação dos Índices de Vegetação na Área de Estudo 38
3.3.1 NDVI 41
3.3.2 SAVI 44
3.3.3 SFDVI 46
3.4 Análise Discriminante na Área de Estudo 49

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 51
4.1 Análise Discriminante 1: 2012 - Ano de Implementação do Projeto 51
4.2 Análise Discriminante 2: 2016 - Ano de Finalização do Projeto 52
4.3 Análise Discriminante 3: 2019 - Sete Anos Após a Implementação do Projeto 54

CONCLUSÃO 57

REFERÊNCIAS 58

INTRODUÇÃO

A desertificação constitui um processo de desgaste e degradação ambiental proveniente de vários fatores físicos, químicos e biológicos. De acordo com a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação / CCD, a desertificação se configura como um processo que ocorre nas terras de zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, devido a diversos fatores que incluem variações climáticas e atividade humana (ONU, 1994; BRASIL, 2005).

Os fatores mais marcantes do processo de desertificação é o antrópico, decorrente do uso e ocupação do solo – desmatamento, irrigação inadequada, uso inadequado da terra na agricultura e pecuária –, além da alteração na periodicidade da sazonalidade climática. Tais fatores promovem a desertificação em áreas suscetíveis a esse processo.

A recuperação de uma área degradada se associa à restauração ecológica, constituindo um processo de restabelecimento do ecossistema danificado ou destruído por uma ação humana ou natural. Um ecossistema recuperado pode ocorrer quando os fatores bióticos a abióticos conseguirem sustentar-se sem o auxílio de subsídios adicionais, ou seja, quando um ecossistema contém recursos suficientes.

Projetos de recuperação de áreas degradadas (PRAD) referem-se ao conjunto de atividades a serem executadas com a finalidade de recuperar o equilíbrio em áreas que sofreram degradação, com o objetivo de reunir informações, diagnósticos, levantamentos e estudos que possibilitem avaliar a degradação ou alteração, para o estabelecimento de medidas para a recuperação de áreas através do plantio e isolamento, ou até mesmo de uso com vistas a outras finalidades.

Projeções futuras indicam um aumento da influência do clima sobre o processo de degradação em regiões semiáridas, o que pode provocar, segundo Marengo (2008), o aumento da frequência e/ou intensidade de secas e aceleração dos processos de aridização e desertificação. Em consequência, isso gera o empobrecimento do solo, provoca impacto na capacidade produtiva dos recursos naturais e leva ao desconforto e perda da qualidade de vida da população que ali sobrevive.

Estudos realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos / FUNCEME demonstram que o estado do Ceará conta com cerca de 11,46% de sua área afetada pelo processo de desertificação, o que acarreta grande pressão sobre os recursos naturais, principalmente na água, no solo e na biodiversidade (CGEE, 2016).

Diante do exposto, a FUNCEME, que já monitorava áreas propícias à desertificação no Ceará, decidiu realizar pesquisas direcionadas à recuperação dessas áreas. Assim, foi executado um projeto apoiado pelo Fundo Nacional de Mudanças do Clima do Ministério do Meio Ambiente, com o objetivo de recuperar cinco hectares de uma área fortemente degradada, em caráter experimental, localizada na sub-bacia hidrográfica do riacho do Brum, no município de Jaguaribe (CE).

O mencionado Projeto de Recuperação de Área Degradada em Processo de Desertificação na Sub-bacia Hidrográfica do Riacho do Brum no Município de Jaguaribe, ou Projeto Brum, utilizou quatro tipos de técnicas, a fim de promover a recuperação da área, dentre elas, a construção de barragens de contenção com o objetivo de segurar os sedimentos, para que não houvesse maior perda de solo devido ao escoamento superficial, evitando a erosão nos montantes dos cursos d'água. O terraceamento, técnica que também foi utilizada, se configura em uma prática eficiente para o controle da erosão, e se associou às barragens de contenção. Outras técnicas executadas na área de intervenção foram a escarificação e o sulcamento, que consistem basicamente na desorganização da superfície do solo, aerando e estimulando o acúmulo de serapilheira da própria área.

Neste sentido, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar a eficiência do Projeto Brum por meio de índices espectrais de vegetação de sensoriamento remoto. Para realizar este tipo de avaliação, tem-se como objetivos específicos a aplicação dos índices NDVI, SAVI e SFDV em três imagens de satélite, possibilitando o acompanhamento evolutivo da cobertura vegetal a partir das técnicas de intervenção realizados pela FUNCEME, através da análise discriminante linear com a utilização desses três índices de vegetação como parâmetro de verificação da eficiência do projeto.

A seguir, apresenta-se a base teórica do estudo, referente aos temas da desertificação e sensoriamento remoto, o contexto da pesquisa, os materiais, métodos, resultados, discussões e conclusão.

1 BREVE HISTÓRICO ACERCA DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO

1.1 O Contexto Mundial

Entende-se por desertificação a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de fatores como variação climática e atividade humana (UNCCD, 2004). Atualmente, esse tema destaca-se como uma preocupação global, devido ao processo acarretado pela ação antrópica em zonas climáticas sensíveis.

A discussão sobre este fenômeno foi iniciada no século XVIII, a partir de estudos realizados na Europa sobre o desencadeamento do impacto a partir das civilizações no Velho Mundo (SOUZA, 2008). Pode-se dizer que o processo de desertificação atinge principalmente três setores – meio ambiente, sociedade e desenvolvimento econômico –, sendo essa a razão pela qual o assunto passou a ser debatido mundialmente.

Durante a década de 1970 a região semiárida da África e a região de Sahel, sul do deserto do Saara, enfrentou grandes dificuldades, ocasionando a devastação de recursos naturais, fome e pobreza. A repercussão sobre o estado em que se encontrava o continente africano mobilizou os outros países que também possuem o mesmo padrão climático, e, desde então, a Organização das Nações Unidas passou a enfrentar esse obstáculo que tem escala mundial (MMA, 2019).

No ano de 1972 a capital da Suécia sediou a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, sendo essa a primeira grande reunião organizada pela ONU sobre assuntos relacionados à degradação do meio ambiente (PASSOS, 2009). A discussão se centrou na questão da poluição da atmosfera e dos recursos naturais, incluindo o caso da África.

Ao considerar que o tema carecia de uma atenção especial e, portanto, de uma discussão específica, cinco anos mais tarde, em Nairóbi (Quênia), a ONU reuniu noventa e quatro países para integrar a Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação / UNCOD, evento que obteve um papel fundamental na consolidação do tema ao redor do mundo.

Na oportunidade, foi criado o Plano de Ação Mundial Contra a Desertificação / PACD, que ressaltava a urgência da atenuação do processo de desertificação, a necessidade de conscientização da população habitante das regiões sensíveis, sendo

concebidas propostas práticas quanto à diminuição do impacto ambiental causado pelas atividades socioeconômicas (ONU, 2018).

O Plano Nacional das Nações Unidas para o Meio Ambiente / PNUMA, de 1991, promoveu uma avaliação a respeito do assunto, constatando o fraco desempenho do Plano de Ação Mundial Contra a Desertificação, devido aos poucos resultados obtidos em relação aos investimentos e à reversão do quadro de degradação (MMA, 2019).

No ano seguinte, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento / UNCED, realizada no Rio de Janeiro, os países que sofriam impactos diretos de desertificação, propuseram a criação de uma convenção internacional envolvendo o tema. Segundo seus participantes, essa convenção constituiria um instrumento jurídico eficaz contra a desertificação, pois os países signatários teriam que assinar um termo de compromisso em prol do progresso e da remediação da degradação gerada pelo processo de desertificação.

É nesse contexto que se inicia o processo de negociação da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação nos Países Afetados por Seca Grave e Desertificação / UNCCD, particularmente na África. A UNCCD entrou em vigor no dia 26 de dezembro de 1996, firmando um acordo internacional com o objetivo de ligar dois campos muito importantes, a saber, o meio ambiente e o desenvolvimento à gestão sustentável da terra, com o foco exclusivo nas terras secas onde se pode encontrar povos e ecossistemas vulneráveis (UNCCD, 2019).

O passo seguinte foi a criação da Conferência das Partes / COP (1997), com o objetivo de controlar a UNCCD, tendo o Brasil como um de seus membros. Desde então, este órgão máximo de controle reune-se anualmente para discutir planos estratégicos para o combate à desertificação.

Dez anos depois a COP 13 traçou uma nova rota estratégica, na cidade de Ordos (China), denominada Quadro Estratégico UNCCD 2018-2030, visando alcançar a neutralidade da degradação da terra (LDN). O impacto da ação alcançou novos participantes, sendo que, em 2018, a Convenção somava 196 países, mais a União Europeia (UNCCD, 2018).

1.2 Semiárido Brasileiro

O Ministério do Meio Ambiente / MMA toma como base as orientações da UNCCD para configurar as áreas susceptíveis à desertificação, adotando o índice de aridez (IA) e a base de classificação climática de Thorntwaite (1941). Tal índice é calculado pela razão entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração (MMA, 2007).

Os critérios de classificação utilizados na identificação de áreas semiáridas contemplam as regiões caracterizadas por forte insolação, altas temperaturas, regimes de chuva escassa, muita instabilidade e concentração de precipitações em um pequeno período, de três meses em média.

Com base nesses critérios, o setor público estabeleceu que o semiárido brasileiro se caracteriza por uma precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros; índice de aridez de até 0,5 calculado pela razão da precipitação e da evapotranspiração potencial no período entre 1961 e 1990; e risco de seca maior que 60% tomando por base o período compreendido entre 1970 e 1990 (BRASIL, 2005).

As regiões climáticas de abrangência da UNCCD dividem-se em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, mas o Brasil não possui áreas com clima árido, apenas semiárido e subúmido seco (IA entre 0,20 e 0,65). Além dessas classes, foi incluída uma terceira categoria relativa às áreas de entorno das semiáridas e subúmidas secas / ASD.

Apesar dessas áreas não se enquadrarem no padrão climático considerado susceptível à desertificação, numa perspectiva formal, a razão de serem aí incluídas se justifica pelo fato de apresentarem características comuns às áreas semiáridas e subúmidas secas, que também apresentam elevada ocorrência de secas e enclaves de vegetação típica do semiárido brasileiro, a caatinga (MMA, 2007).

Para a definição das áreas de entorno como uma categoria específica, foram considerados os seguintes critérios:

1) Municípios de entorno que tenham sido afetados por secas, envolvendo, nesses casos, listas de municípios atendidos oficialmente por programas de secas emergentes, administrada pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste / SUDENE;
2) Municípios de entorno que também fazem parte da área do Bioma Caatinga, conforme estudos realizados pelo Conselho Nacional de Reserva da Biosfera do Bioma Caatinga (BEZERRA, 2004);

3) Municípios adicionados à área de atuação da SUDENE, a partir do disciplinamento da Lei nº 9.690, de 15.07.1998, como os incluídos no Estado do Espírito Santo.

Algumas pesquisas demonstram que as regiões semiáridas sofreram secas ou cheias de grande impacto, em várias partes do mundo, por um dado período. Segundo Marengo (2006, p. 23),

> O regime pluviométrico delimita duas estações bem distintas: a estação de chuvas, com duração de três a cinco meses, e a estação de seca, com duração de sete a nove meses. Tais condições, dentre outras, determinam o sucesso da atividade agrícola e pecuária e a sobrevivência das famílias.

A Caatinga, que é a área que concentra a maior zona semiárida brasileira, cobre cerca de 63% do território nordestino, tendo uma extensão territorial de aproximadamente 800.000 km². Apesar da grande extensão territorial deste bioma, como de sua ampla utilização, a Caatinga ainda é um ecossistema pouco estudado, em comparação aos outros biomas encontrados no Brasil.

A formação vegetal encontrada na Caatinga tem feições muito bem definidas, com árvores de porte baixo e arbustos que, na grande maioria, perdem as folhas na estação seca. Isso reduz a transpiração e a perda de água das plantas, entretanto elas voltam a florescer na estação chuvosa. Durante a estação seca, a mata espinhosa torna-se a característica mais acentuada da Caatinga.

Em síntese, a região Nordeste se caracteriza por forte inconstância climática, por apresentar os valores meteorológicos mais extremos do país, a mais forte insolação, a mais baixa nebulosidade, as mais altas médias térmicas, as mais altas taxas de evaporação, e os mais baixos índices pluviométricos, que geram em torno de 500 a 800 mm anuais (OLIVEIRA, 2006).

1.3 Ceará

No domínio da Caatinga, o estado do Ceará, com 92% de influência da semiaridez, possui a maior parte do seu território enquadrado no semiárido brasileiro. Apresenta áreas alarmantes que são resultantes da degradação ambiental e desertificação (LEITE *et al*.,1993; FERREIRA *et al*.,1994).

Parte do solo cearense apresenta embasamento cristalino, padrão que dificulta o acúmulo de água subterrânea e propicia maior aridez, sendo susceptível à erosão, além de uma das maiores densidades do Nordeste (INPE, 2003).

De acordo com os índices de aridez estabelecidos, o Ceará apresenta oito municípios susceptíveis à desertificação (ASD), abrangendo 99.262 hectares, sendo eles: Jaguaribe, Jaguaretama, Jaguaribara, Alto Santo, Iracema, São João do Jaguaribe, Limoeiro do Norte e Morada Nova (SANTOS; AQUINO, 2016).

Dentro do limite territorial cearense, a região do Médio Jaguaribe configura uma área aproximada de 4.214,7 Km^2, constituída pelos municípios de Jaguaribe, Jaguaribara e Jaguaretama, que se sobressai por apresentar processos avançados de degradação (INPE, 2003).

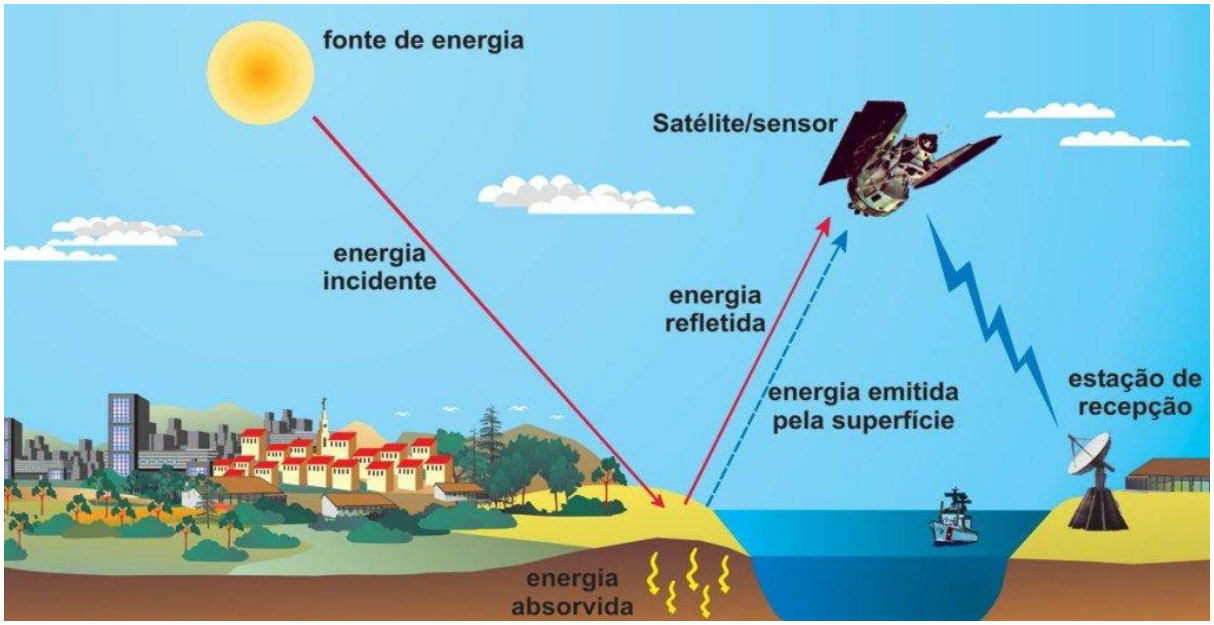
Diante desse cenário, sobressai-se uma interrogação: como monitorar de forma efetiva, prática e eficiente tais ambientes? Uma possibilidade de fazer isso volta-se para a utilização do sensoriamento remoto, uma das tecnologias de coleta automática de dados mais bem-sucedidas em todo o mundo, cuja finalidade principal é a monitoração dos recursos terrestres em escala global (MENESES, 2012).

2 SENSORIAMENTO REMOTO

Jensen (2011) observa que o sensoriamento remoto pode ser definido pela captação de informações sobre um objeto sem que haja contato físico direto. A técnica foi disseminada à época das grandes guerras mundiais do século XX, com fins militares, visando captar imagens de baixa altitude para o planejamento das estratégias de confronto.

Foi apenas na década de 70 que se colocou, pela primeira vez, um satélite em órbita com o propósito de obter dados dos alvos terrestres (ROSA, 2009). Nos dias de hoje, os sensores remotos espalhados pelo mundo permitem que se obtenham as informações necessárias para mapear e monitorar o uso e ocupação do solo.

Figura 1 - Obtenção de Imagem por Sensoriamento Remoto



Fonte: FLORENZANO, 2011.

A figura acima descreve como é realizada a captação de dados a partir de sistemas sensores. A fonte de energia solar emite energia incidente, na qual parte da radiação é absorvida pela superfície, enquanto outra parte é refletida. Partindo do pressuposto que o planeta também emite energia pela superfície, os sistemas sensores captam as informações obtidas através da energia refletida e energia emitida da Terra. A partir disso, os dados de comprimentos de onda são enviados para as estações de recepção, para serem

utilizadas no processamento digital de imagens, posteriormente, a fim de fornecer informação para a comunidade científica e a população.

Assim, as imagens de sensoriamento remoto aparecem como uma ferramenta estratégica para o futuro, tendo em vista que podem representar a única forma factível de realizar monitoramento ambiental em escalas locais e mundiais (CRÓSTA, 2002).

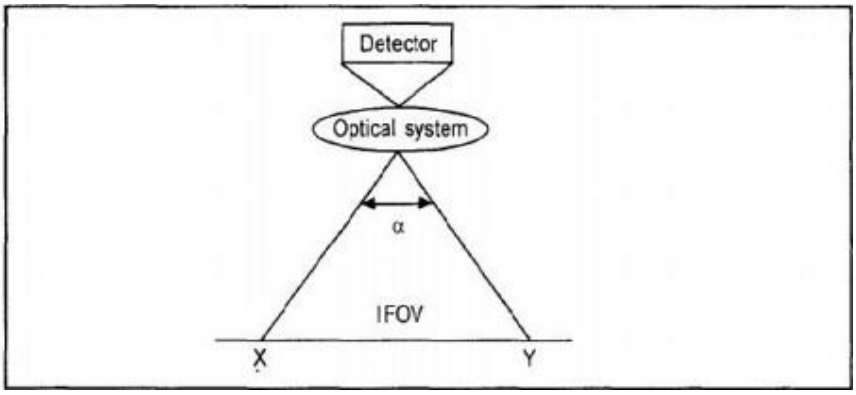
2.1 Imagens de Alta Resolução

A estrutura da imagem de sensoriamento remoto é caracterizada por uma matriz que possui linhas com informações "X" e colunas com informações "Y". Cada pixel da imagem possui uma informação "Z" referente ao nível de cinza, denominado *digital number* (DN). O pixel tem sua localização a partir das coordenadas estabelecidas por "X" e "Y".

A resolução das imagens de sensoriamento remoto se define de acordo com três critérios: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica (CRÓSTA, 2002). A resolução espacial está associada à capacidade do sistema sensor conseguir retratar um objeto em dada altitude, de maneira que a resolução é maior quando a imagem mostra os objetos menores na superfície terrestre.

Pode-se estipular a resolução espacial através do IFOV, ou campo instantâneo de visada (Figura 2), que determina o que pode ser identificado no campo de visão do sistema sensor. Se um determinado sensor possui um IFOV com capacidade de 30 metros, isso significa que cada pixel da imagem gerada possui 30 metros de resolução.

Figura 2 - Campo Instantâneo de Visada / IFOV



Fonte: Brainkart, 2019

A resolução espectral é uma característica específica das imagens multiespectrais e hiperespectrais, constituída pelo número de bandas espectrais relacionado à largura do comprimento de onda, de forma que uma imagem de maior resolução tem um menor comprimento de onda com mais bandas espectrais.

As imagens hiperespectrais possuem maior resolução espectral do que as imagens multi, devido ao seu maior número de bandas ao longo da faixa do espectro. Por fim, a resolução radiométrica que se refere ao número de níveis de cinza na imagem, e quanto mais tons diferentes de cinza maior será a sua nitidez; consequentemente, melhor será a resolução da imagem gerada pelo sensor.

O número de níveis digitais é expresso em função do número de "bits" e isso significa que a quantidade de níveis de cinza é igual ao número 2 elevado a algum número. Obrigatoriamente, uma imagem com mais bits apresenta mais tonalidades entre o preto e o branco, gerando uma imagem com maior resolução radiométrica.

2.1.1 Quickbird

O satélite Quickbird, lançado nos Estados Unidos em 2001, oferece imagens de alta resolução espacial que podem chegar em até 61cm. O presente trabalho utiliza dados deste sistema sensor, que é amplamente utilizado para mapeamento com alta precisão e outras aplicações na área ambiental, tais como mudanças no uso e ocupação do solo e monitoramento de recursos naturais (EMBRAPA, 2013).

As imagens desse sensor operam em cinco faixas espectrais, sendo: modo pancromático, no qual a resolução pode variar entre 0,61m e 0,72 m, com resolução radiométrica (nível cinza) de 2.048; modo multiespectral, na faixa do visível (níveis azul, verde e vermelho) e na faixa do infravermelho próximo com resolução entre 2,4 m e 2,8 m, com resolução radiométrica também de 2.048.

Tabela 1 – Imagens do Satélite Quickbird

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
Pancromático	Pancromática	445 - 900 nm	0.61 a 0.72 m	1 a 3,5 dias, dependendo da latitude	16,5 km x 16,5 km	11 bits
Multiespectral	Azul	450 - 520 nm	2.4 a 2.8 m			
	Verde	520 - 600 nm				
	Vermelho	630 - 690 nm				
	Infravermelho Próximo	760 - 900 nm				

Fonte: Embrapa, 2019

2.1.2 Pleiades

Este trabalho também utiliza como fonte imagens da constelação Pleiades, cujo primeiro satélite (1A) foi lançado em 2011, na França, ao tempo em que o segundo (1B) foi lançado na Itália, no ano seguinte.

O grande diferencial desse sistema sensor é a rapidez de aquisição de dados, através da programação da câmera do sensor, é possível aumentar o número de alcance de imagens por passagem, ferramenta de extrema importância para o uso civil e militar. As imagens de resolução radiométrica de 12 bits geradas a partir do sensor operam em cinco faixas espectrais, sendo ou no modo pancromático, onde a resolução pode chegar até 0,5m, ou no modo multiespectral, na faixa do visível (azul, verde e vermelho) e na faixa do infravermelho próximo com resolução de 2 m.

Tabela 2 – Imagens da Constelação Pleiade

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
Pancromático	Pancromática	470-830 nm	0,5 m	1 dia	20 km x 20 km e 100 km x 100km	12 bits
Multiespectral	Azul	430-550 nm	2 m			
	Verde	500-620 nm				
	Vermelho	590-710 nm				
	Infravermelho Próximo	740-940 nm				

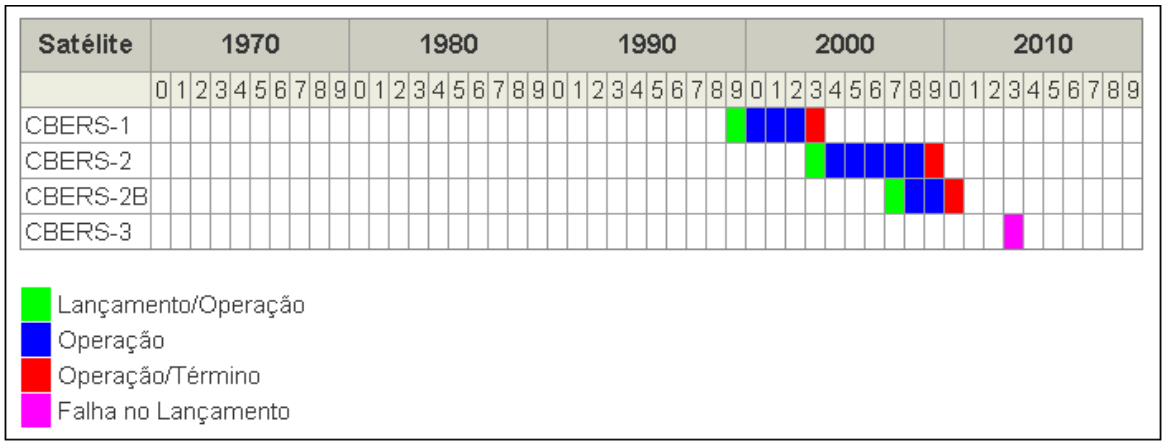
Fonte: Embrapa, 2019

2.2 Imagem CBERS

A sigla CBERS significa Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, e o objetivo desse satélite é o de monitorar os recursos terrestres. Surgiu a partir de um programa de cooperação tecnológica entre a China / Academia Chinesa de Tecnologia Espacial e o Brasil / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017). O sensor captura imagens ao longo de toda superfície terrestre que se tornam instrumentos de estudo, análise e tomada de decisões em diversos setores, como meio ambiente, geologia, recursos hidrológicos, agricultura e outros.

A missão CBERS proporcionou grande avanço tecnológico ao Brasil. Foram lançados quatro sensores no Centro de Lançamento de Tai Yuan a partir de 1999. O primeiro (CBERS-1) teve um tempo médio de vida projetado para dois anos, sendo desativado em 2003, três anos pós lançamento. O CBERS-2 foi lançado no mesmo ano de desativação do CBERS-1 e capturou em média 175 mil imagens ao longe de seis anos, sendo desativado em janeiro de 2009. O terceiro foi o CBERS-2B, lançado pela missão em 2007 e desativado em 2010. O último sensor lançado até o presente momento foi o CBERS-3, que, diferentemente dos outros três teve seu tempo de vida estipulado para três anos, mas se perdeu no espaço devido a falhas no lançamento, ocorrido em 2013 (EMBRAPA, 2019).

Tabela 3 – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres



Fonte: Embrapa, 2019

Desde 2001, os satélites CBERS fazem parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (EMBRAPA, 2019) e disponibilizam gratuitamente, para todo o país,

as imagens de sensoriamento remoto. O sensor CBERS-3 é o único possuidor da câmera pancromática (PAN) e da câmera multiespectral regular (MUX) e projetado para conseguir adquirir dados de visadas laterais entre os quatros sensores da missão CBERS. As imagens CBERS-3 possuem resolução radiométrica de 8 bits, o que significa, 256 níveis de cinza associados aos pixels formando a imagem.

De acordo com a descrição dos sistemas sensores feita pelo INPE e compilada pelo site da Embrapa (tabela “xx), a câmera multiespectral possui resolução de 10 metros podendo ser fusionada a partir da câmera pancromática, podendo chegar a uma resolução espacial de até 5 metros.

Tabela 4 - CBERS 3 / Câmera Pancromática e Multiespectral

CBERS 3					
Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Área Imageada
PAN	Verde	0,51 - 0,85µm	52 dias	10 m	60 km
	Vermelho	0,52 - 0,59µm			
	Infravermelho Próximo (NIR)	0,63 - 0,69µm			
	PAN	0,77 - 0,89µm		5 m	

Fonte: Embrapa, 2019

2.3 Comportamento Espectral

Uma informação gerada a partir da imagem de satélite é um comprimento de onda denominado de espectro, informação que possibilita a identificação de padrões e análises de diferentes tipos de alvos na natureza.

A feição espectral de um material corresponde à medida d e sua reflectância ao longo do espectro eletromagnético, ou seja, um sensor mede a radiação refletida e gera um dado de reflectância com vales e picos bem definidos no comprimento de onda. Com base nestes dois parâmetros, torna-se viável analisar as absorções em um determinado material (ROSA, 2009).

As feições espectrais são produtos de processos eletrônicos e vibracionais que a radiação provoca (MENESES, 2001), e, tendo isso em vista, cada alvo terrestre apresenta

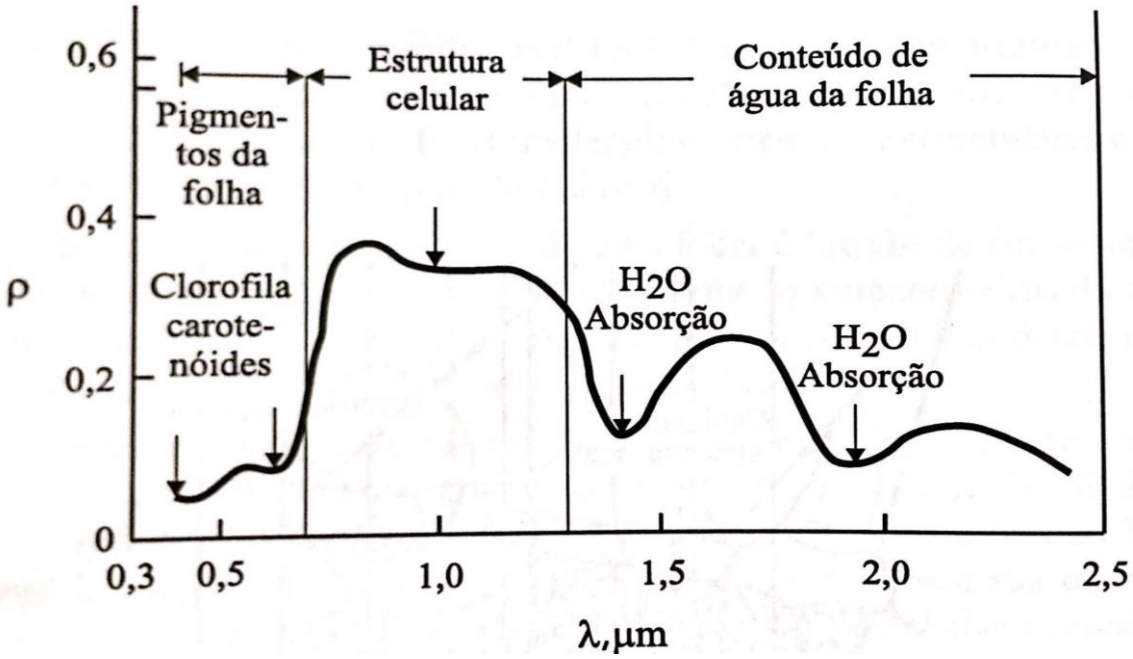
uma resposta diferente de reflectância. É com base nessas características que são estabelecidos modelos bem definidos para cada tipo de alvo, os quais podem ser comparados.

A Figura 3 exibe o comportamento espectral típico de uma folha saudável. Inicialmente, na região do visível, entre 0,4 nm e 0,6 nm, pode-se observar a baixa reflexão resultante da absorção dos pigmentos do grupo da clorofila.

Os vales que caracterizam a absorção nessa região estão em aproximadamente 0,48 nm e 0,68, representam respectivamente a presença de carotenos e clorofila, o que corresponde a atividade fotossintética.

O pico entre os dois vales se deve à reflexão na cor verde, o que justifica a coloração da planta. Entre 0,7 nm e 1,3 nm, a reflexão é maior, caracterizando também um maior albedo, comportamento que compreende a estrutura celular da folha. Outro padrão observado na folha sadia são as absorções de água em 1,3 nm e 1,9. É importante ressaltar que o espectro analisado é o de uma folha em condições ideais, e que, a partir deste padrão de assinatura espectral, torna-se possível a comparação de áreas vegetadas.

Figura 3 - Curva de Reflectância Típica de uma Folha Verde



Fonte: Novo (1989)

Evidentemente, o *alvo solo* apresenta uma feição espectral completamente diferente do *alvo vegetação*, e isso se dá em virtude das diferentes absorções e reflexões

ao longo do espectro. A complexidade do espectro é maior devido a variabilidade de minerais, tipos de rocha e tipos de solo, sendo possível visualizar a presença de argilominerais como caulinita e gibbsita, óxidos de ferro, matéria orgânica, água, entre outros componentes.

Geralmente, possui um formato mais côncavo e abaulado do que a feição espectral de uma folha verde, mas de todo modo é recomendável analisar caso a caso, pois cada tipo de solo possui proporções diferentes de minerais. Portanto, torna-se necessário conhecer as feições características dos minerais, como a caulinita, gibbsita, goethita e hematita, além de identificar padrões de matéria orgânica para assegurar qual tipo de solo está sendo observado. Conhecendo as características e os padrões das feições dos alvos, o diagnóstico do estado em que se encontra o meio pode ser analisado.

2.4 Índices de Vegetação

O avanço do sensoriamento desencadeou diversos estudos envolvendo operações aritméticas, a fim de desenvolver índices aplicáveis que pudessem servir de ferramenta para auxiliar o monitoramento terrestre.

Geralmente, estas operações relacionam os comprimentos de onda do vermelho ao infravermelho próximo, pois essas duas faixas constituem a maior resposta espectral da vegetação. No presente trabalho serão utilizados quatro índices de vegetação, NDVI, CO_2Flux, SAVI e EVI, com vistas ao exame da região onde foi executado o Projeto Brum.

2.4.1 NDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, ou Normalized Difference Vegetation Index / NDVI foi desenvolvido por Rouse *et al*. (1974) para separar vegetação verde do brilho de solo de fundo (ROSA, 2009), conforme se segue:

$$NDVI = \frac{\mathrm{NIR} - RED}{NIR + RED}$$

A equação acima diz respeito à região onde ocorre 90% da resposta espectral da vegetação entre o RED (banda correspondente ao vermelho) e o NIR (banda correspondente ao infravermelho próximo). A região do RED possui menor albedo do

que o NIR devido à alta absorção dos pigmentos foliares. Já o NIR possui alta reflectância, o que é explicado na estrutura celular da planta.

O NDVI é amplamente utilizado devido a uma qualidade particular, qual seja, a razão da diferença pela soma das bandas reduz muitos tipos de ruídos causados pela sombra das nuvens, variações topográficas, luz solar e interferências atmosféricas (JENSEN, 2011).

O resultado obtido através dessa operação é um valor que varia entre 0 a 1, considerando que os valores que se aproximam a 1 indicam a área de cobertura vegetal, enquanto os valores próximos a zero significam ausência de cobertura vegetal.

2.4.2 SAVI

Ao adicionar uma variável "L" para a correção dos efeitos da cor e brilho do solo no denominador da equação de NDVI, tem-se o Soil Ajusted Vegetation Index / SAVI, proposto por Huete (1988). Esse índice no intuito de minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação (ROSA, 2009).

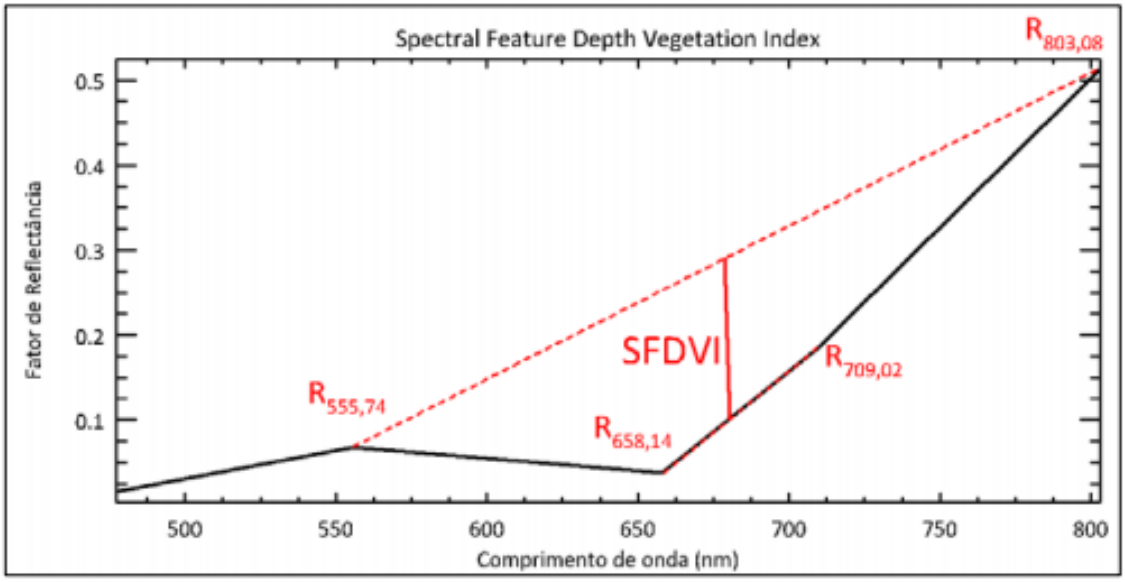
A constante "L" varia de acordo com a área vegetada sob análise em áreas de vegetação rala, sendo indicada a adoção de "L=1.0". Para áreas intermediárias e com alta densidade de vegetação se usa, respectivamente, "L=0,5" e "L=0,25". A equação do SAVI apresenta-se conforme abaixo, sendo "L" a variável de ajuste do solo:

$$SAVI = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED} + \mathrm{L}}(1 + L)$$

2.4.3. SFDVI

O Índice de Vegetação por Profundidade de Feição Espectral, abreviado por SFDVI, foi desenvolvido pelo pesquisador Gustavo Baptista (BAPTISTA, 2014) para identificar áreas onde ocorre atividade fotossintética. O índice baseia-se na profundidade da feição que está localizada entre os picos de reflectância na região do verde e do infravermelho próximo (NIR). A figura "xx" demonstra graficamente a definição de SFDVI.

Gráfico 1 - SFDVI



Fonte: Spectral Feature Depth Vegetation Index – SFDVI. Adaptado de Baptista (2014)

Este índice assegura a discretização da atividade fotossintética promovendo uma menor saturação que acorre normalmente na aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada. A equação de bandas é descrita por:

$$SFDVI = \left(\frac{B4 + \mathrm{B1}}{2}\right) - \left(\frac{\mathrm{B3} + \mathrm{B2}}{2}\right)$$

Como B2 sendo representado pela banda do verde, $B3$ é a banda localizada na região do vermelho, $B4$ é o NIR. Ou seja, sucintamente, o SFVI analisa a profundidade da feição entre os picos de reflectância na região do verde e na região do infravermelho próximo. O resultado após a aplicação deste índice de vegetação, assim como os outros descrevidos, é um valor variante de -1 a 1, tendo sabido que os números negativos representam a áreas não fotossintéticas ou ausência de vegetação e os números positivos indicam a presença de cobertura vegetal ou áreas fotossinteticamente ativas (BAPTISTA, 2015).

Como resultado, os valores digitais variam entre -1 e +1, sendo que os positivos se relacionam às áreas com maiores quantidades de vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto os negativos representam áreas não fotossintéticas ou sem vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

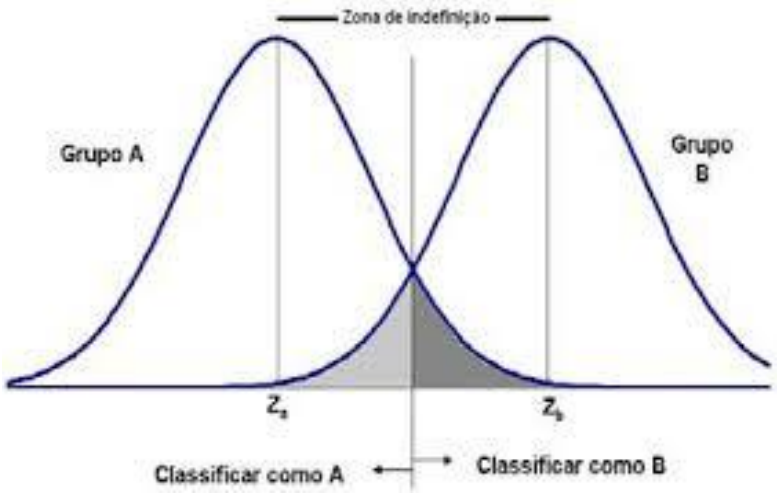
2.5 Análise Estatística

No presente trabalho, a análise estatística dos dados utilizados visa justificar e, portanto, comprovar os resultados obtidos. As técnicas de análise estatística multivariada com funções discriminantes, também conhecidas como análise discriminante linear, foram utilizadas para identificar e diferenciar as populações que, inicialmente, pareceram semelhantes.

Segundo Landim (2011), aplica-se essa técnica em grupos que receberam mensurações idênticas, como forma de distinguir um dos outros. Além de ser um método classificatório, que minimiza as probabilidades de uma classificação errônea, possui outra particularidade positiva, sendo capaz de identificar quais variáveis contribuem para a referida classificação.

A lógica do método consiste na análise de todas as características de cada indivíduo, ao mesmo tempo, e na atribuição de um valor (escore). Com base nos atributos de cada indivíduo, este escore irá definir em qual grupo ele pertence. Para aferir o grupo ao qual o membro é pertencente, torna-se necessário atribuir um ponto divisor entre dois ou mais grupos. Caso ocorram dois grupos com a mesma variância, o ponto divisor será a média entre os grupos. Por fim, com base no escore do ponto divisor, é possível classificar os membros dos grupos.

Gráfico 2 – Ilustração do Gráfico de Análise Discriminante



A ideia básica da análise discriminante é substituir o conjunto das características em uma função linear discriminante que possui “P” mensurações. A função pode ser descrita conforme a equação abaixo:

$$Di = \lambda 1x1 + \lambda 2x2 + \cdots + \lambda pxp$$

Onde “P = n° de variáveis”; “X = variáveis”; e “λ = coeficientes. A função “Di” gera um resultado, ou escore, e será analisado com “Do”, que é o ponto divisor ou o centro dos dois grupos. A partir daí, pode-se afirmar com máxima discriminação a qual grupo o indivíduo pertence (LANDIM, 2011).

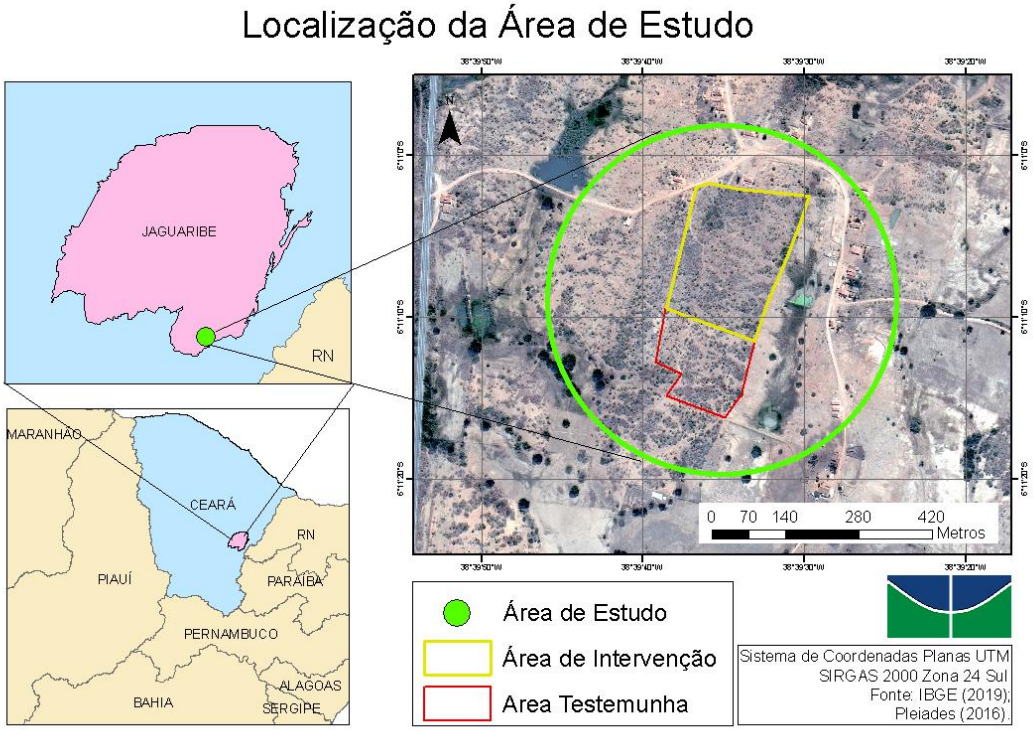
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

Após diversos estudos realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos / FUNCEME, em relação ao processo de degradação que o estado do Ceará enfrenta, chegou-se a conclusão de que as regiões críticas – Inhamuns, município de Irauçuba e entorno, mais a região do Médio Jaguaribe – necessitavam de ações de remediação urgente, pois o quadro indicava a degradação do solo, da cobertura vegetal e dos recursos hídricos, com comprometimento direto na capacidade produtiva das terras.

A recuperação de área degradada em processo de desertificação na sub-bacia hidrográfica do riacho do Brum no município de Jaguaribe foi uma ação experimental que consistia em técnicas simples de manejo e treinamento da comunidade para que esta conseguisse manter as práticas. O projeto recuperou cinco hectares na sub-bacia do Brum, localizado no município de Jaguaribe, no Ceará (Figura 4), como ferramenta teste para replicação em outras áreas reféns deste processo de desertificação.

Figura 4 – Área de Estudo



Fonte: IBGE (2015); DNIT e Google Earth Pro

3.1.1 Localização e Acesso

A área de atuação do projeto de recuperação na sub-bacia do Brum faz parte da Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe e se localiza entre os paralelos 06°11’’01’ de latitude sul e 38°39’’29’ de longitude oeste, no Distrito de Mapuá. Seguindo pela BR-116, o local de estudo fica a 345 km de Fortaleza, aproximadamente. Com o auxílio das ferramentas de sensoriamento remoto, foram delimitadas duas áreas com as mesmas características fisiográficas, objetivando a comparação e o acompanhamento do progresso. Constitui uma área com 5,0 ha, onde foram aplicadas as técnicas de manejo e outra área testemunha com 3,0 ha onde não foram aplicadas as mesmas técnicas.

Figura 5 – Projeto Brum

Fonte: Relatório Final Projeto Brum - FUNCEME (2016)

3.1.2 Aspectos Socioeconômicos

Estima-se que atualmente Jaguaribe possui uma população de 34.729 habitantes. Segundo o último censo realizado, em 2010, a população era de 34.409 com uma densidade demográfica de 18,33 hab/km² (IBGE, 2019). De acordo com a estimativa do IBGE de 2016, o município possui um Produto Interno Bruto Per Capita de R$13.091,49 com um Índice de Desenvolvimento Humano / IDHM de 0,621 (IBGE, 2010).

O projeto de recuperação de área degradada executado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos / FUNCEME foi realizado na sub-bacia do Riacho do Brum, local conhecido como Sítio do Brum. À época de implementação do projeto estimou-se que a região abrigava 30 famílias, totalizando cerca de 100 habitantes (RELATÓRIO).

A FUNCEME realizou o estudo com base em questionários de campo, abrangendo gênero, idade e escolaridade da população residente. Foram entrevistadas vinte e duas famílias, ou sessenta e oito moradores, sendo 25% do sexo feminino, na faixa dos 18 e 30 anos, o que representava a maioria das mulheres da região. A maioria da população masculina da área tinha idade oscilando entre 45 e 60 anos, representando 32,3% dos homens.

Constatou-se que a escolaridade em geral é baixa e que a maioria dos habitantes não possuíam sequer o ensino fundamental completo. As atividades econômicas consistem basicamente em agropecuária e artesanato, e passaram por um período de crise devido à forte estiagem ocorrida nos anos de 2010, 2012 e 2013, além das chuvas abaixo da média nos anos seguintes (BRASIL, 2016). Cerca de 95% dos moradores entrevistados relataram o estado de degradação em que o Sítio do Brum se encontrava. As lamentações da população sobre a região baseavam-se na perda de vegetação, no desaparecimento dos animais, na fraqueza do solo para as atividades agrícolas e no aumento da temperatura e escassez de chuvas (RELATÓRIO).

3.1.3 Aspectos Físicos

Em mapeamento de nível detalhado – escala 1:100.000 – no município de Jaguaribe realizado pela FUNCEME, em 2009, se constatou que 23% do território estava em processo de desertificação, e que as áreas mais afetadas se encontravam em estado irreversível em relação a cobertura vegetal (FUNCEME, 2009).

3.1.3.1 Geologia

A área de estudo encontra-se no município de Jaguaribe, próxima à divisa com o município de Icó. Está inserida no sistema ambiental denominado Sertão Centro Ocidental, caracterizado por ser um geossistema complexo. Esses dois municípios de influência geológica na área de estudo apresentam predominância de rochas do embasamento cristalino, e a base do substrato geológico desses municípios é constituída por rochas gnáissicas e migmáticas do Pré-Cambriano Inferior.

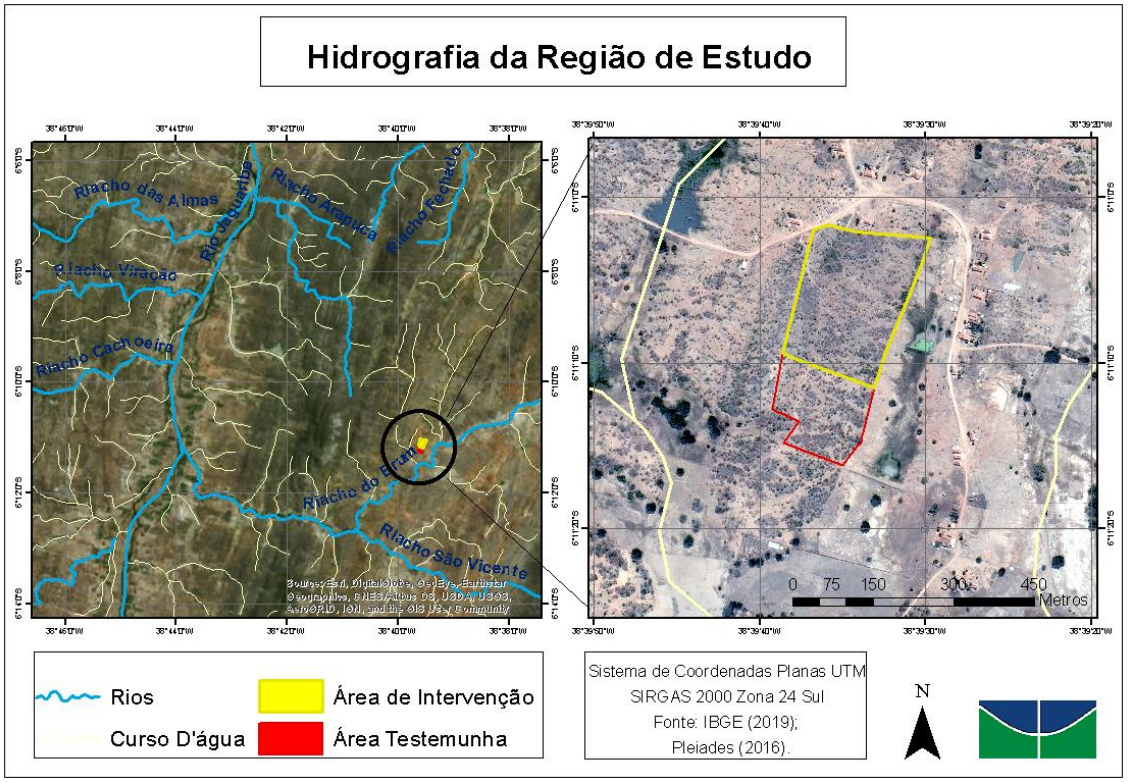
As duas principais unidades geológicas que compõem o entorno do território do projeto são as rochas do Sistema Orós-Jaguaribe e da Suíte Serra do Deserto. O Sistema Orós-Jaguaribe se localiza no Nordeste do Brasil, na porção centro-sul da província de Borborema (ALMEIDA *et al*., 1977) exibe uma zona linear e contínua com 500 km de extensão, incluindo o Piauí, Rio Grande do Norte e Ceará, onde sua mais parte, encontra-se no estado do Ceará (PARENTE e HENRIARTHAUD, 1995).

No sistema Orós-Jaguaribe destaca-se o Complexo Jaguaretama, constituído por ortognaisses migmatizados, composição entre granito e tonalito, com paragnaisses, anfibolitos, quartzitos, metaultramáficas e rochas calcissilicáticas, e os metarriolitos, por vezes associados a metarriodacitos e/ou dacitos e/ou metatufos ácidos, da Formação Campo Alegre (ALMEIDA et al., 1977). Já a Suíte Granitóide Serra do Deserto é constituída por augenortognaisses graníticos, à biotita e hornblenda, servindo de encaixantes para corpos de tonalitos ou quartzodioritos e sienogranitosgnaissificados do Grupo Orós (CAVALCANTE, 1999).

3.1.3.2 Hidrologia

A área de estudo é rodeada pelo Riacho do Brum, nas proximidades do Riacho Deserto (Figura 6), ambos afluentes do Rio Jaguaribe. A região apresenta escoamento superficial influenciado pelo regime variável de chuvas característico do semiárido cearense. A pluviometria média do município é de 700 mm por ano, com escoamento dos rios intermitentes variando em torno de 63 mm. O período de maior precipitação concentra-se no primeiro semestre, sendo fevereiro, março e abril os meses mais chuvosos. Consequentemente, o segundo semestre é o período de seca e o território sofre com os impactos da estiagem.

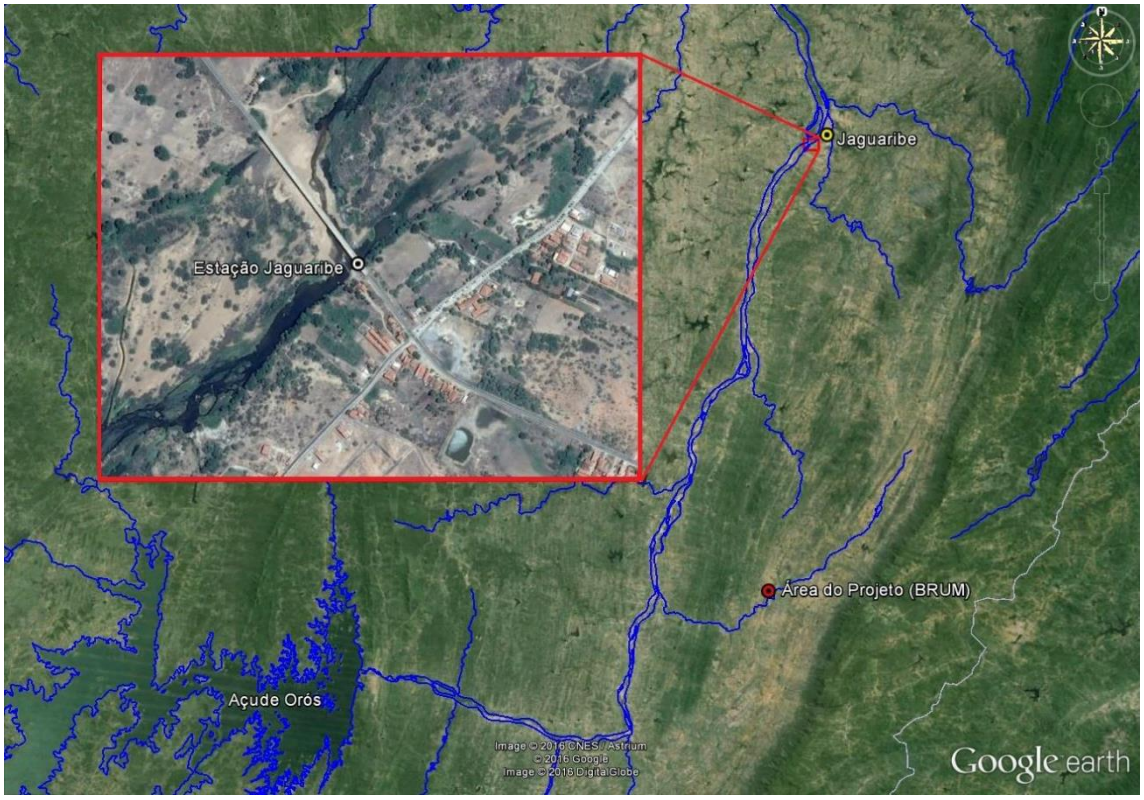
Figura 6 – Mapa de Rios e Curso D'água



Fonte: Alice Santana (2019)

A estação 36320000 da Agência Nacional de Águas / ANA, localizada no Rio Jaguaribe, faz o levantamento do potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica que são indicadores necessários para classificar qualidade da água na região (Figura 7). De acordo com a resolução do CONAMA No. 357/2005 para águas doces, classe 2, entre os anos 2008 e 2016 (época de estudo e implementação do projeto), os recursos hídricos apresentaram-se dentro do limite estabelecido, com pH entre 6 e 9 e temperatura entre 27 e 31°C.

***Imagem 1 –Estação* 36320000 / ANA**



Fonte: FUNCEME, 2016

Na região do semiárido brasileiro a condutividade elétrica, que é um indicador importante na detecção de poluição, sofre grandes influências devido à sazonalidade climática. Normalmente, em água doce, a condutividade é inferior a 500 µS cm-1 e os valores acima podem indicar o quadro de poluição. Foi analisado um trecho do Rio Jaguaribe e a CE variou de 140,0 a 505,3 µS cm-1, o que está dentro dos limites, considerando que em períodos de seca os índices pluviométricos diminuem e a evaporação aumentam, por isso os valores de condutividade elétrica tendem a ser maiores.

3.1.3.3 Climatologia

O estado do Ceará é caracterizado por dois tipos de clima: tropical úmido e semiárido. Localizado entre 2° s e 7° s, sua área fica próxima à linha do equador, sofrendo ação dos ventos alísios que aumentam o fluxo do regime eólico na região. O território semiárido, onde se encontra o município de Jaguaribe, registra grande quantidade de secas periódicas, e a região subúmida se concentra na parte litoral e nas regiões de maior elevação topográfica.

O período de chuva ocorre entre os meses de janeiro e julho, com pré-estação chuvosa no mês de dezembro para as zonas úmidas, que se estende em regiões de maior elevação e do litoral do estado. O regime pluviométrico anual pode ultrapassar os 900 mm.

Existem dois sistemas meteorológicos para o estabelecimento das chuvas, quais sejam: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que provoca umidade durante o máximo de oscilações no hemisfério Sul, e a massa Equatorial Atlântica que transporta os ventos alísios úmidos.

O semiárido, predominante em quase todo o estado do Ceará, é marcado pela escassez hídrica durante todo ano, com maior intensidade na região central. O período chuvoso na região dura de três a cinco meses, entre fevereiro e abril, sendo que a seca pode se estender por até nove meses. A amplitude térmica anual é baixa, em oposição às taxas de evapotranspiração. Se forem avaliados em condições normais de chuvas, os índices pluviométricos ficam entre 500 e 800 mm, o que gera um déficit hídrico na região. Junho é o mês da pós-estação chuvosa, e os sistemas causadores de chuva são as ondas de leste e os complexos convectivos de mesoescala. A ocorrência de chuva é pequena no segundo semestre do ano, com predomínio de altas pressões atmosféricas e quase inexistência de fenômenos atmosféricos causadores de chuva que caracterizam a estação seca.

A média de chuvas no município de Jaguaribe é de 747,9 mm, entretanto, nos últimos anos do monitoramento do projeto, as chuvas ficaram abaixo cerca de 40% dessa média (FUNCEME, 2016). A tabela abaixo mostra a classificação climatológica do município de Jaguaribe, além da precipitação, temperaturas médias e período chuvoso.

Tabela 5 – Classificação Climatológica da Região do Município do Jaguaribe

Classificação Climática	Precipitação anual (mm)	Temperatura Média (°C)	Período chuvoso
Bsh, semiárido quente - (koppen) D, semiárido (Thornthwaite)	747,9	26 a 28	Fevereiro a maio

Fonte: FUNCEME, 2016

3.1.3.4 Vegetação

A vegetação do bioma Caatinga caracteriza-se pela adaptabilidade à escassez hídrica, apresentando árvores e arbustos de baixo porte, com aspecto seco, retorcido, raízes grossas e bem desenvolvidas, e folhas pequenas. À época de estiagem, que ocorre no segundo semestre do ano na área de estudo, as folhas secam para proteger a planta da alta incidência solar e da ausência de chuvas, evitando, portanto, a desidratação.

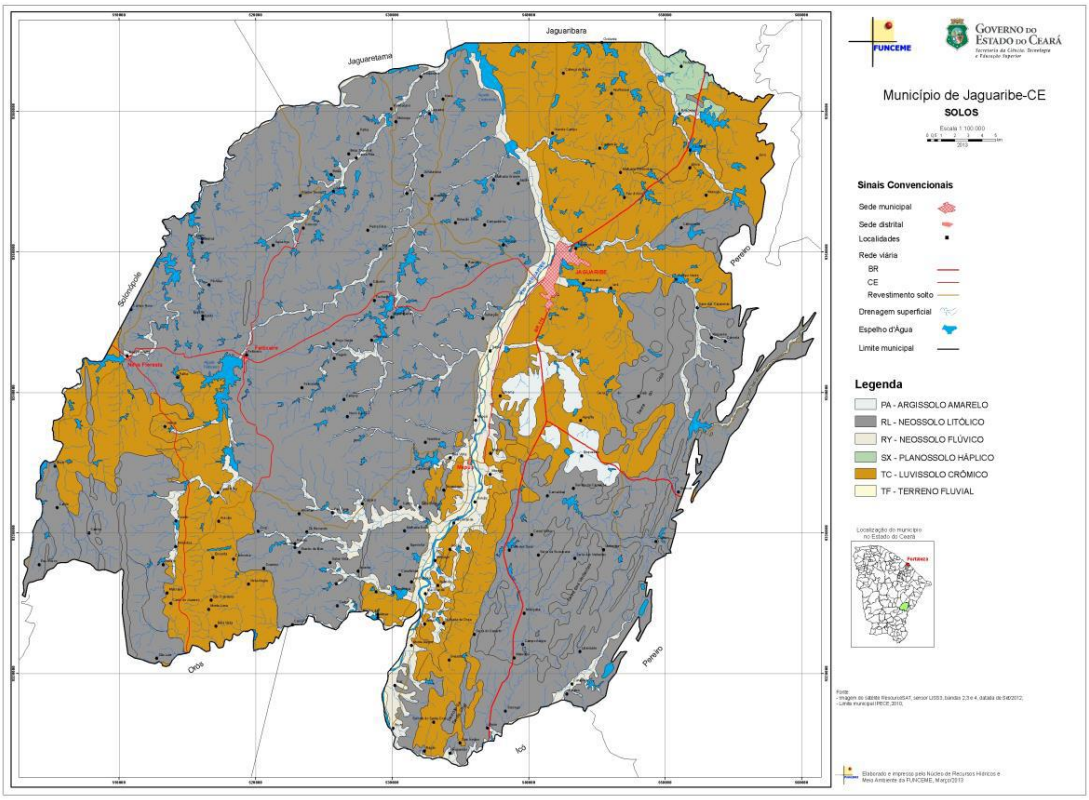
A Caatinga hiperxerófila dominava na região anteriormente à degradação e apresentava uma formação vegetal com alta capacidade de tolerância às altas temperaturas. Na época de implementação do projeto, foi observado um pequeno grau de preservação, tendo em vista que este tipo de vegetação ainda foi encontrado no entorno da área de intervenção, apesar dos danos advindos da prática da pecuária extensiva, cultivo de algodão e agricultura de subsistência, que são as principais atividades econômicas da região.

3.1.3.5 Solo

O município de Jaguaribe apresenta uma composição de solos variados (Figura 7), que se caracterizam por serem rasos e altamente susceptíveis aos processos erosivos, sendo eles, argissolo amarelo, neossolo flúvico, planossolo háplico, luvissolo crômico, terreno fluvial e em predominancia, neossolo litólico (BRASIL, 1973). Na área em estudo observa-se a presença de dois desses tipos de solos: o argissolo amarelo e o neossolo litólico.

Segundo a Embrapa Solos, o argissolo é composto por material mineral e que tem como diferencial o horizonte B textural constituído de argila (EMBRAPA, 2006). Possui profundidade variável, com textura que varia de arenosa a argilosa no horizonte A, e de média a muito argilosa no horizonte Bt (B textural), havendo uma transição gradativa do horizonte A ao Bt em relação ao teor de argila. A classificação amarelo é o 2° nível de categorização dos argissolos, e isso significa que possui uma cor amarelada no horizonte diagnóstico subsuperficial do solo.

Figura 8 – Mapa Pedológico do Município de Jaguaribe



Fonte: FUNCEME, 2016

Os neossolos são solos em início de formação, constituídos por materiais minerais ou materiais orgânicos pouco evoluídos, devido à pequena intensidade de processos pedogênicos. O clima, o relevo e o tempo podem ser fatores limitantes no processo de evolução deste tipo de solo (EMBRAPA, 2006), bem como o material de origem que pode apresentar maior resistência a intemperismos físico/químicos.

É importante ressaltar, que, diferentemente, dos argissolos, os neossolos não dispõem de horizonte B diagnóstico definido, sendo que alguns podem apresentar o horizonte B com pequena espessura (KER et al., 2015). A classificação Litólico é o 2° nível de categorização que compreende pelo contato lítico dentro de 50 cm da superfície.

De acordo com os moradores da região onde o projeto foi implementado, a área foi amplamente utilizada para a plantação de algodão mocó e pastagem para alimentar o gado bovino. Com o passar do tempo, o pisoteamento do gado ocasionou um elevado grau de compactação do solo, desencadeando um maior grau de escoamento superficial da água responsável pelo carregamento de sedimentos da superfície, levando assim boa parte da camada de matéria orgânica do solo, maior lixiviação, menor infiltração, e, consequentemente, acarretando em processos erosivos. Esses descuidados em relação ao

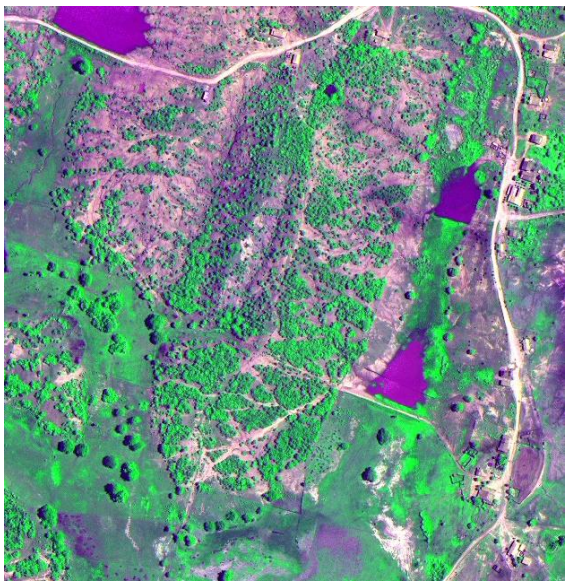
manejo do solo foram decisivos para diminuir a fertilidade e a capacidade produtiva da área, caracterizando a área como degradada.

3.2 Base Metodológica

Para este tipo de estudo, no qual a observação e o acompanhamento da recuperação da área degradada ao longo dos anos é o objetivo central de pesquisa, foram utilizadas três imagens obtidas a partir de sensoriamento remoto, conforme a descrição seguinte.

A primeira imagem, de alta resolução espacial do satélite Quickbird (8 bits com composição colorida 3,4,1 e filtro linear 2%), foi capturada no período de implementação do Projeto Brum (22/02/2012), época onde a área de intervenção da área de estudo ainda não havia recebido as técnicas de manejo, ou seja, estava degrada e apresentava aspectos característicos de um processo avançado de desertificação.

Imagem 2 - Projeto Brum / Satélite Quickbird



Fonte: Quickbird (2012)

A segunda imagem utilizada foi a do satélite Plêiades, também de alta resolução (8 bits com composição colorida 3,4,1 e filtro linear 2%), podendo chegar a até 61 centímetros de resolução na banda pancromática. Esta imagem foi adquirida pela FUNCEME em 10/072014, justo no ano de finalização do projeto de recuperação, para

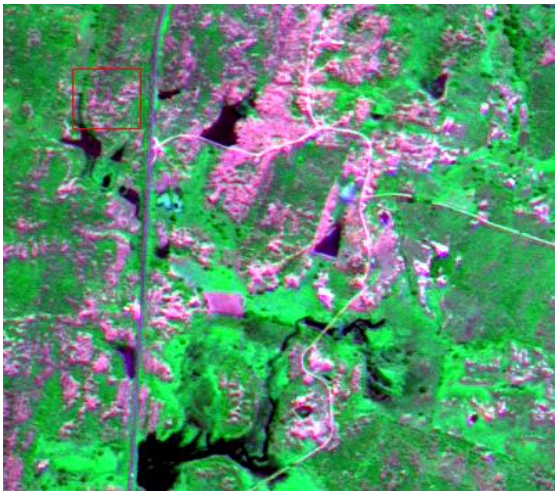
efeitos de comparação da situação anterior e posterior às intervenções realizadas pelo projeto.

Imagem 2 - Projeto Brum / Satélite Plêiades

Fonte: Pleiades (2012)

A terceira imagem foi capturada pelo satélite CBERS (8 bits com composição colorida 2,3,1 e filtro linear 2%). O programa CBERS nasceu da parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial e hoje suas imagens são ferramentas importantes para o monitoramento do uso e ocupação do solo brasileiro. Apesar de não se tratar de uma imagem de alta resolução, como as outras duas, a imagem CBERS possui resolução de 10 metros e foi fusionada a partir da banda pancromática para obter uma resolução de 5 metros e assim ser comparada com as demais imagens.

Imagem 3 - Projeto Brum / Satélite CBERS



Fonte: CBERS (2012)

Para análise das imagens, foram utilizados quatro softwares: o Arcgis PRO, plataforma responsável pela espacialização dos dados e pelos mapas gerados da área de estudo; o ENVI Classic, sistema operacional que tornou possível a aplicação dos três índices espectrais de vegetação nas três imagens de satélite; o Excel, programa responsável pela compilação e organização dos valores obtidos a partir dos índices de vegetação; o software BioStat, utilizado na aplicação da função discriminante sobre as duas áreas de estudo e na geração de gráficos representativos dos pontos que foram discriminados.

3.3 Aplicação dos Índices de Vegetação na Área de Estudo

Anteriormente à aplicação dos índices NDVI, SAVI e SFDVI na plataforma ENVI Classic, as imagens foram especializadas no Arcgis PRO. Criou-se um projeto com sistema de coordenadas planas/projetáveis UTM (Universal Transversa Mercator) definida como zona 24 sul, zona que o município de Jaguaribe está localizado. Este passo foi o primeiro, pois somente após a definição do sistema de coordenadas, as imagens podem ser encontradas em algum lugar do espaço. Para tanto, a ferramenta *Define Projection*, que integra o *Data Management Tools*, uma interface de análises do Arcgis PRO, possibilitou a definição do sistema de coordenadas.

Após a definição do sistema de coordenadas das imagens de 2012, 2014 e 2019, foram feitas as delimitações das duas áreas de estudo (Figura 8), a área de intervenção do projeto e a área testemunha (área sem intervenção). O produto desta delimitação é um

arquivo em formato shapefile. Com a delimitação das áreas bem definidas, pôde-se fazer um sorteio aleatório de 30 pontos na área de intervenção e 30 pontos na área testemunha, totalizando 60 pontos em cada uma das três imagens utilizadas neste estudo (figura “xx”).

Figura 8 - Delimitação das Áreas de Estudo

Fonte: Alice Santana (2019)

A ferramenta *Create Random Points*, um componente do Arcgis PRO, possibilitou a geração de um arquivo de pontos em formato *shapefile* utilizado na análise dos índices de vegetação.

Figura 9 - Shape de Pontos Aleatórios Plotados sobre a Área de Estudo

Fonte: Arquivo da Autora

Com a delimitação das áreas de estudo pronta e os pontos plotados, deu-se início ao processamento das imagens no software ENVI. Foram selecionados três índices espectrais de vegetação, sendo eles, o NDVI, o SAVI e o SFDVI com intuito de identificar cobertura vegetal nas áreas de estudo a fim de comprovar a evolução da recuperação desta área ao longo dos sete anos.

Antes de se aplicar os índices de vegetação nas imagens, houve um tratamento inicial das imagens Quickbird, Plêiades e CBERS constituído de três etapas. Inicialmente as três imagens foram cortadas na ferramenta *Resize Data* (aba *Basic Tools* da barra inicial de ferramentas) para aplicar os índices apenas na região de interesse. O segundo passo foi transformá-las em 8 bits a partir do *Stretch Data* para aplicação do índice NDVI e SAVI. Por fim, utilizou-se essas imagens de 8 bits para remoção do contínuo espectral, que consiste em medir a intensidade da feição de absorção.

O índice SFDV, diferentemente dos outros, que utilizaram as imagens de 8 bits, teve sua equação aplicada sobre as imagens que com remoção do contínuo espectral (imagens CR), pois os outros índices tratam de diferença normalizada, enquanto o SFDVI não.

3.2.1 NDVI

A aritmética de bandas consiste em operações matemáticas que as envolvem, sendo utilizada para destacar alvos terrestres, como por exemplo: alvo solo, mineral, água e vegetação. As operações aritméticas são responsáveis pelo desenvolvimento dos índices espectrais. O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada foi escolhido pois é um meio de inferir sobre capacidade fotossintética da área, de modo geral, identifica áreas vegetadas e não vegetadas.

O programa ENVI dispõe de um mecanismo muito simples na aplicação de fórmulas aritméticas de bandas, e se localiza na barra de ferramentas principal do software; o instrumento *Band Math* é uma ferramenta que realiza as operações matemáticas de bandas. É nesta interface que a fórmula de NDVI foi exposta.

$$float(b4 - b3)/(b4 + b3)$$

De forma que $b4$ é a banda 4 representada pelo infravermelho próximo (NIR) e $b3$ é a banda 3 caracterizada pela região do vermelho. As duas imagens de alta resolução possuem as quatro bandas, mas a imagem CBERS possui apenas 3 bandas, por isso, foi necessário o ajuste da fórmula para uma imagem de apenas três bandas que ficou da seguinte maneira:

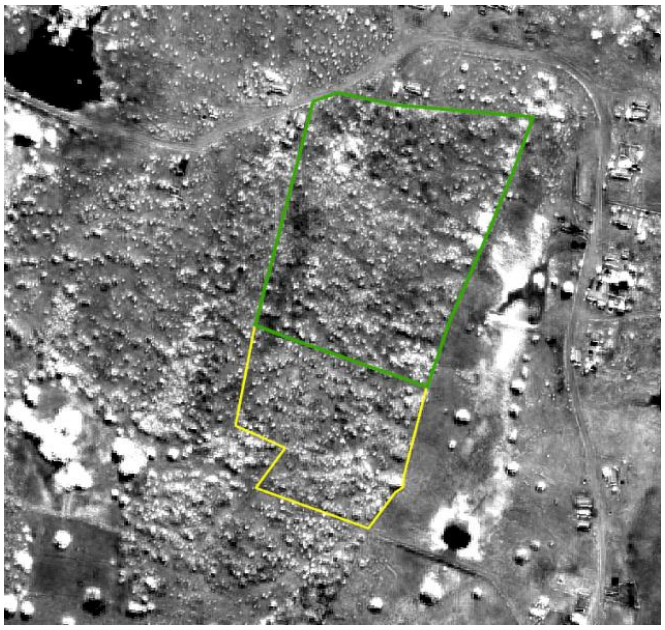
$$float(b3 - b2)/(b3 + b2)$$

O índice foi aplicado sobre as três imagens, a imagem de 8 bit do ano de 2012, a 8 bits de 2016 e a 8 bits de 2019 utilizando o *Band Math*, e esta ferramenta gera como produto uma imagem onde os pixels possuem valores que variam de -1 a 1 que expressam a presença ou não de vegetação. As imagens abaixo monstram o produto gerado após a aplicação do índice de vegetação NDVI sobre as áreas de estudo. Quanto mais escuro for o pixel, menor será o seu valor atribuído, ou seja, mais próximo será de -1, o que indica a ausência de cobertura vegetal, e, quanto mais claro o nível de cinza do pixel, maior o valor atribuído, o que indica valores maiores, podendo chegar até a 1, o que expressa uma área altamente fotossintética mente ativa.

***Imagem 3 - Quickbird (2012) /* NDVI**

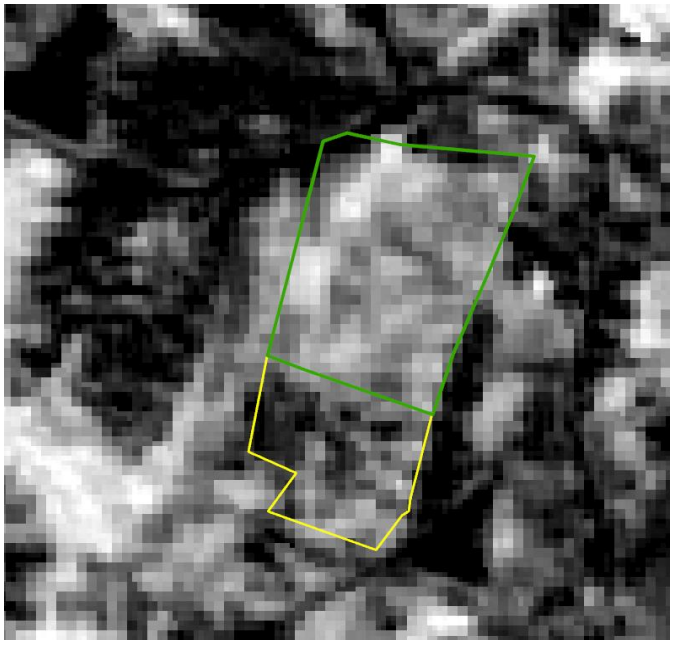
Fonte: Quickbird (2012)

***Imagem 4 - Plêiades (2016) /* NDVI**



Fonte: Pleiades (2016)

***Imagem 5 - CBERS (2019) /* NDVI**



Fonte: CBERS (2019)

As imagens acima revelam dois aspectos interessantes na análise dos dados. Primeiramente, comparando a imagem de 2012 com a imagem de 2016, observa-se que a imagem Quickbird possui maior contraste associado aos pixels pretos e brancos em relação a imagem 2016, capturada após a implementação do projeto. É nítida a visualização dos aglomerados de caatinga e das áreas degradadas que são desprovidas de vegetação ao longo de toda a área de estudo, na primeira imagem, enquanto na segunda imagem o contraste se suaviza, tornando-a mais homogênea e provida de mais tons de cinza.

É importante ressaltar nesta análise comparativa entre as imagens 3 e 4 que os aglomerados de vegetação que estão bem definidos na Imagem 3 não se apresentam em destaque na Imagem 4, ou seja, preliminarmente, pode-se aferir a partir da tonalidade dos pixels que os valores pertencentes aos aglomerados claros e bem demarcados na Imagem 3 são mais próximos de 1 do que os aglomerados que não estão evidentes na Imagem 4. Presume-se então que que as áreas que estavam mais degradadas (mais escuras) na Imagem 3 tornaram-se menos degradadas na Imagem 4 devido à menor presença de pixels pretos; em contrapartida, a vegetação bem demarcada por aglomerados brancos na Imagem 3, são escurecidos na imagem 4, o que significa uma queda na capacidade fotossintética das plantas. Este fator pode ser explicado pela seca enfrentada no ano de

2016, como pela data que a imagem foi capturada, ou seja, no mês que inicia a estação caracterizada pela estiagem.

O segundo aspecto interessante a ser analisado nestes dados é a definição da Imagem 5 em relação às outras imagens. Como pode-se perceber, a imagem do ano de 2019 não possui a mesma qualidade de definição que as imagens dos outros anos, o que se justifica pela menor resolução espacial da imagem CBERS em relação as imagens de alta resolução Quickbird e Plêiades. Mesmo com a menor definição, é possível notar uma separação entre a área de intervenção do projeto e a área testemunha em relação a tonalidade dos pixels. Percebe-se que na área de intervenção do projeto os pixels apresentam-se mais claros em relação aos pixels pertencentes a área testemunha, o que denota maiores valores de NDVI na área de intervenção do que na área testemunha, o que será discutido posteriormente.

3.2.2 SAVI

Outro índice escolhido como variável da análise discriminante, é o Soil Adjusted Vegetation Index, conhecido como SAVI. O seu diferencial é o ajuste de solo que é representado pela constante "L" na fórmula com o intuito de minimizar os efeitos que o solo de fundo exerce na resposta espectral do alvo vegetação. O processo para aplicação do índice SAVI é o mesmo que o utilizado no NDVI e no SFDVI, na ferramenta Band Math é digitado a seguinte expressão:

$$float(((b4 - b3)/(b4 + b3 + 1)) * (1 + 1))$$

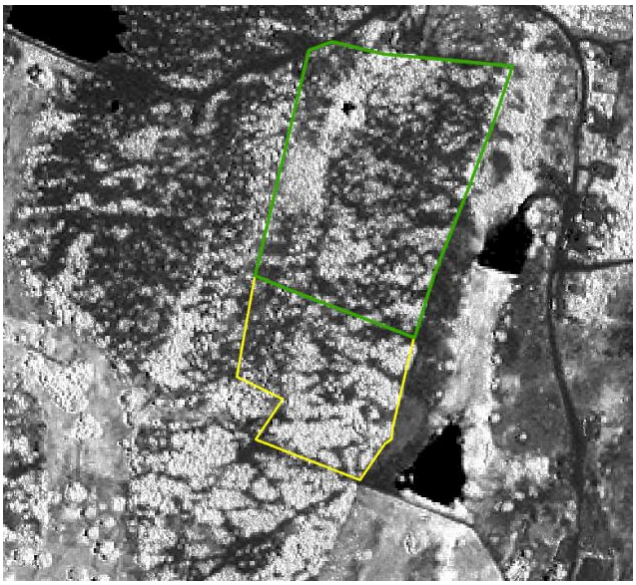
No caso da região de estudo, que está localizada no Bioma Caatinga, adotou-se a variável como sendo 1(L=1), tendo em vista que se utiliza o valor 0,25 para ambientes de vegetação densa, 0,5 para regiões intermediárias e 1 para regiões que são caracterizados por vegetação rala, o que é o caso da vegetação da Caatinga.

Devido a diferença na quantidade de bandas da imagem CBERS, a fórmula de SAVI também foi modificada para se obter resultados comparativos, assumindo a seguinte formulação:

$$float(((b3 - b2)/(b3 + b2 + 1)) * (1 + 1))$$

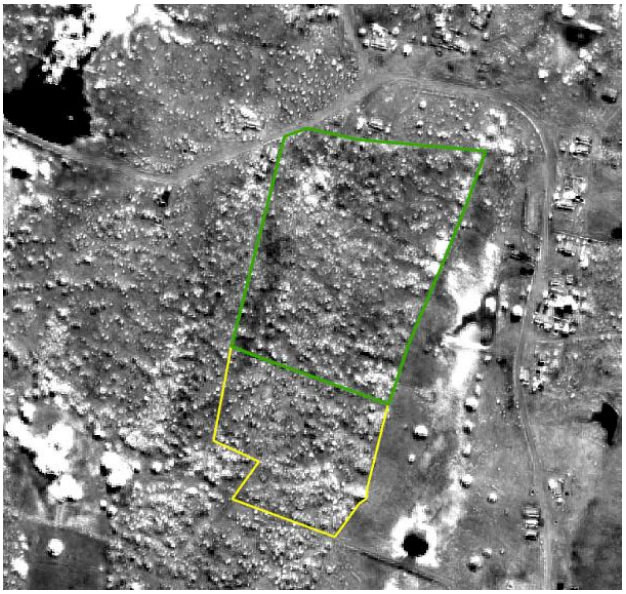
O resultado obtido a partir da aplicação desta função matemática sobre as imagens de sensoriamento remoto são três imagens com tons variando entre branco e preto, semelhante ao dado de NDVI explanado anteriormente, conforme abaixo:

Imagem 6 - Quickbird (2012) / SAVI



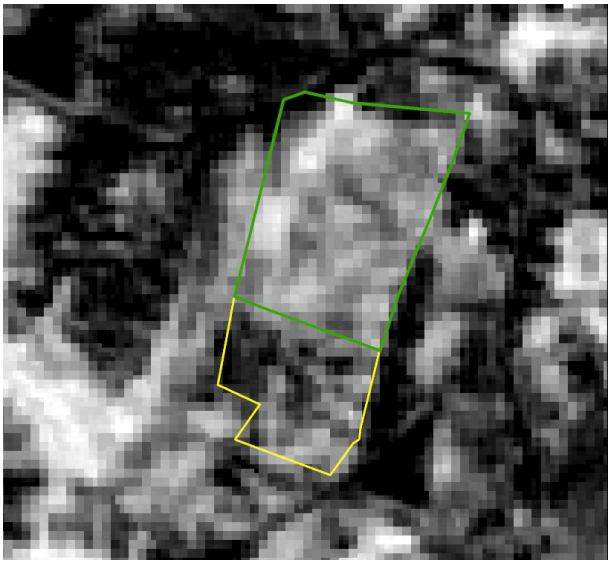
Fonte: Quickbird (2012)

Imagem 7 - Plêiades (2016) / SAVI



Fonte: Pleiades (2016)

Imagem 8 - CBERS (2019) / SAVI



Fonte: CBERS (2019)

Assim como o dado de NDVI, o SAVI atribui valores que variam entre -1 a 1 aos pixels, sendo esse número que determina a tonalidade da cor cinza do pixel. Sendo assim, os pixels mais escuros indicam valores mais próximos de -1, enquanto pixels mais claros denotam presença de vegetação, com valores mais altos, próximos a 1.

3.2.3 SFDVI

O terceiro índice de vegetação utilizado como variável da análise discriminante foi o Spectral Feature Depth Vegetation Index (SFDVI) que calcula a profundidade da feição a partir dos picos de reflectância na região do verde (banda 3) e da região do infravermelho próximo (NIR). A metodologia de aplicação da função é a mesma utilizada em todos os índices, a partir da ferramenta Band Math. A fórmula utilizada para este cálculo nas imagens de alta resolução é expressa por:

$$float((b4 + b1)/2) - ((b3 + b2)/2)$$

Conforme a equação, $b1$ é a banda 1, caracterizada pela região do azul, $b2$ é a banda 2, onde encontra-se a região do verde, $b3$ é a banda 3, definida pela região do vermelho e $b4$ é caracterizado pelo infravermelho próximo. Como esclarecido

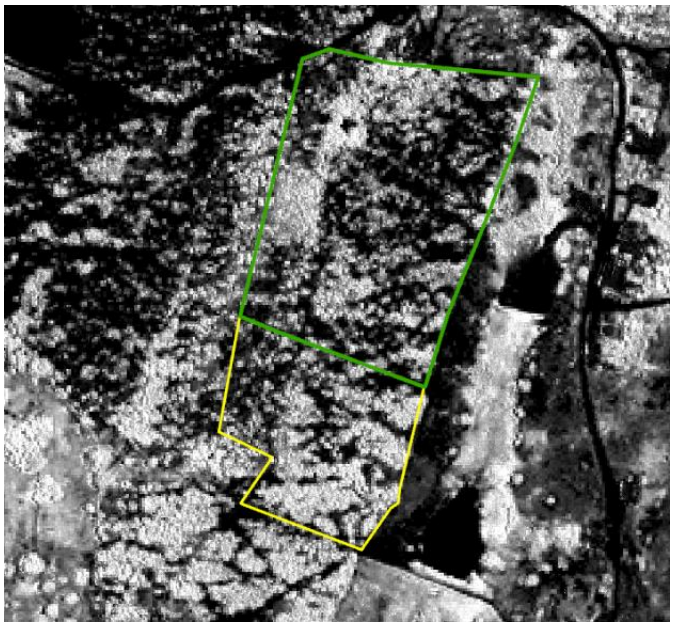
anteriormente, a equação de SFDVI também precisou ser ajustada as três bandas do CBERS, adquirindo a seguinte configuração:

$$float((b3 + b1)/2) - ((b2 + b1)/2)$$

Com base na aplicação do índice nas imagens de 2012 (CR), 2016 (CR) e 2019 (CR), obteve-se três imagens compostas por pixels com valores atribuídos de -1 a 1 compondo três imagens em níveis de cinza mas diferentemente dos outros índices utilizados, os números foram reescalonados para valores positivos, assim, podendo variar de 0 a 1 (fig "xx), considerando que os valores mais próximos de 1, descrevem uma área vegetada. Para obter este resultado, utilizando a ferramenta Band Math, aplicou-se a seguinte equação sobre as imagens de SFDVI (CR):

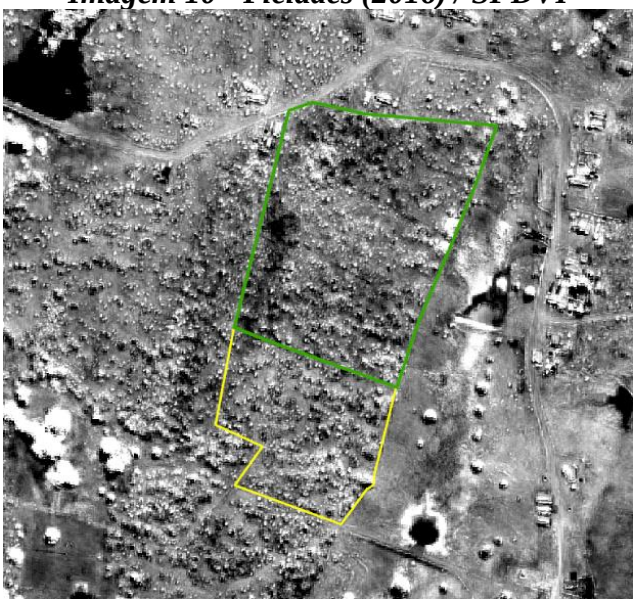
$$float(b1 + 1)/2$$

Imagem 9 - Quickbird (2012) SFDVI



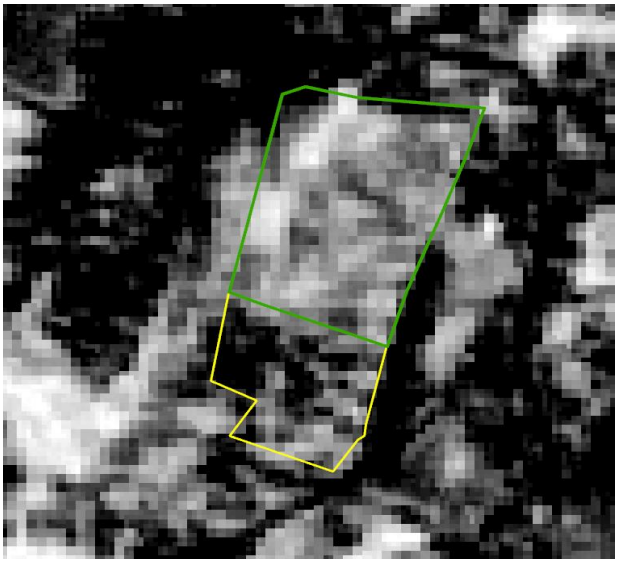
Fonte: Quickbird (2012)

Imagem 10 - Plêiades (2016) / SFDVI



Fonte: Pleiades (2016)

Imagem 11 – CBERS (2019) / SFDVI



Fonte: CBERS (2019)

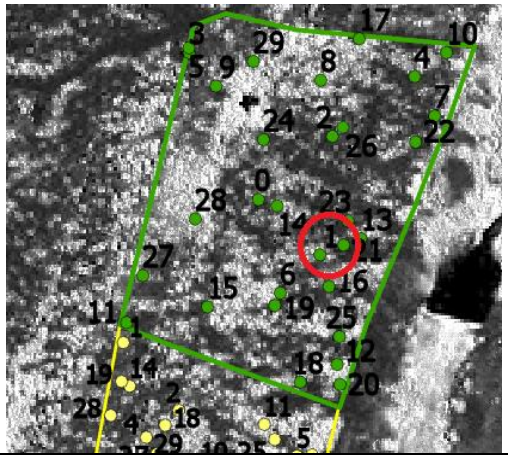
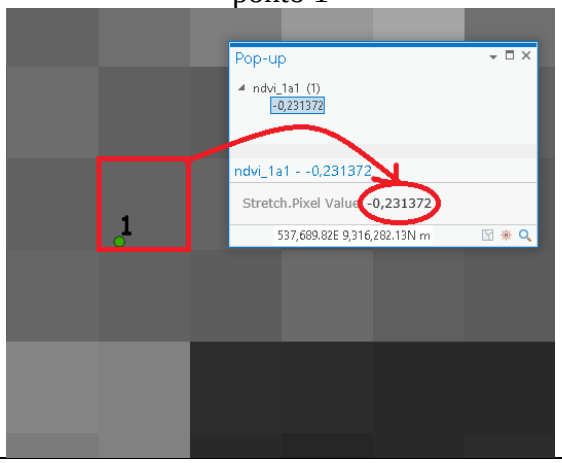
Dos três índices de vegetação utilizados no estudo, este apresentou uma maior diferenciação entre as imagens em relação ao contraste entre as cores preta e branca, evidenciando o comportamento da vegetação nas áreas de estudo. Isso se dá pela utilização das imagens com remoção do contínuo espectral. Assim como os outros índices aplicados, os pixels mais claros demonstram valores mais altos, enquanto os pixels mais escuros dispõem de valores mais baixos. As imagens foram produzidas com remoção do contínuo espectral e reescalonadas para valores positivos.

3.4 Análise Discriminante da Área de Estudo

A análise estatística dos dados obtidos a partir dos valores de NDVI, SAVI e SFDVI foi realizada a fim de discriminar a área vegetada da área não vegetada, utilizando as duas áreas de estudo. Considerando que o Projeto Brum delimitou duas áreas, uma como sendo a área que receberia todas as práticas de intervenção e outra área como objeto de comparação para acompanhamento da evolução da área de intervenção, pode-se realizar uma análise discriminante para verificar se houve revegetação da área de intervenção.

O shapefile de pontos aleatórios foi plotado nas nove imagens geradas a partir da aplicação dos três índices de vegetação nas três imagens de satélite, para identificar os valores dos índices atribuídos ao pixel que continha o ponto. Desta forma, foi possível detectar o valor de cada um dos trinta pixels selecionados na área de intervenção e dos trinta pixels selecionados na área testemunha.

Figura 10 – Valor do Índice de vegetação no Pixel Selecionado

Shapefile de pontos aleatórios plotados sobre a imagem Quickbird com o índice NDVI	Valor de NDVI do pixel que contém o ponto 1
	

Considerando que em cada imagem foram analisados 60 pixels, obteve-se um total de 540 valores para serem analisados e discriminados a partir da função discriminante de Fisher. A partir dos pontos sobrepostos a imagem, foi identificado o mesmo pixel na

imagem de 2012, na imagem 2016 e na imagem 2019 e este possuía três valores sendo, NDVI, SAVI e SFDVI, respectivamente. Os dados foram compilados no Excel como forma de planilha para serem utilizados na geração do gráfico onde discrimina cada um dos pontos selecionados.

O software estatístico BioStat foi o responsável pela geração da análise discriminante. Com base nas três planilhas feitas contendo os três valores dos índices nos 60 pixels analisados para cada ano, o programa gerou uma função para os pontos da área de intervenção e uma função para os pontos da área testemunha. Transformando as duas funções obtidas para cada ano em gráfico, tem-se três gráficos, um para 2012, um para 2016 e um de 2019 que expõe o comportamento discriminante dos pontos.

Adotou-se esta metodologia para comparar a diferenciação dos pontos da área que não recebeu intervenção com a área que recebeu as técnicas de manejo. Espera-se que na imagem de 2012, os pontos não se diferenciem pois nenhuma das duas áreas sofreram intervenção, o que significa que não houve tratamento diferenciado nas duas áreas. A partir de 2016, o resultado provavelmente adotará uma nova configuração, tendo em vista que o projeto foi finalizado neste ano. Entende-se que a partir da imagem Plêiades, tirada em 2016, os pontos comecem a se diferenciar, caracterizando a diferenciação da área que sofreu intervenção da área que não foi tratada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

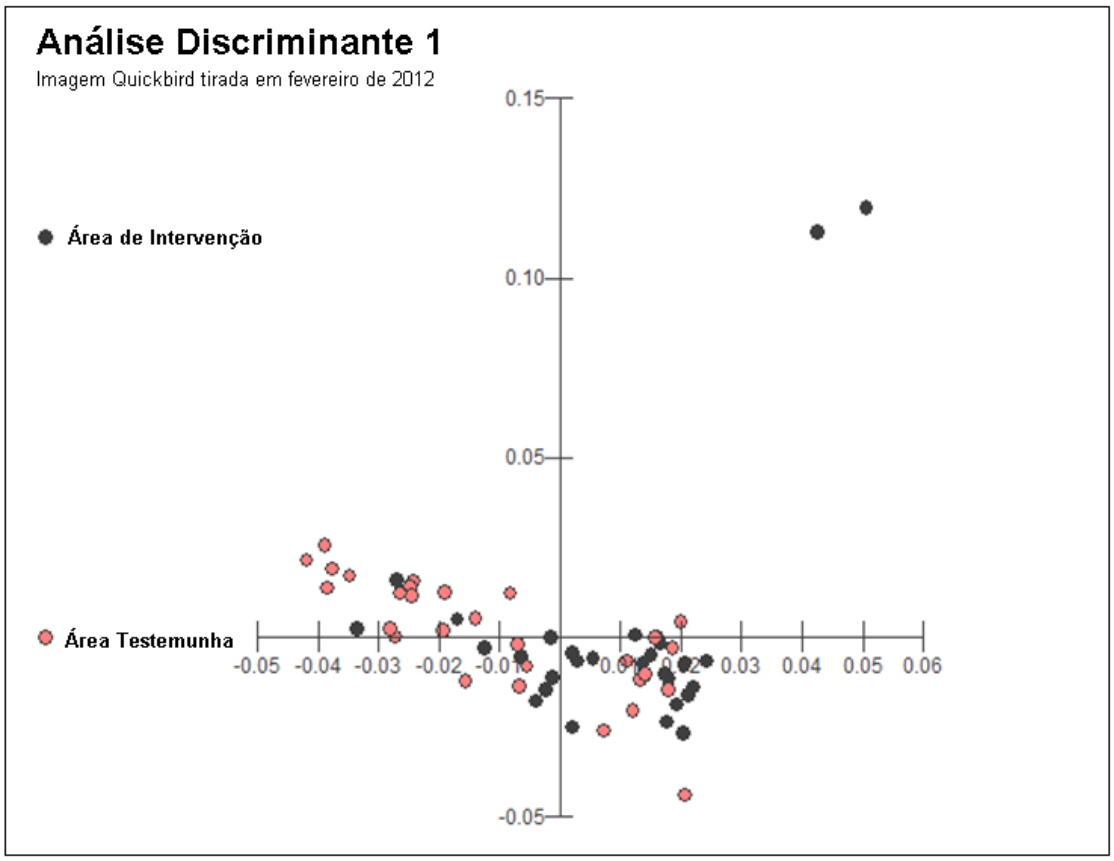
4.1 Análise Discriminante 1: 2012 - Ano de Implementação do Projeto

A partir da função discriminante de Fisher aplicada nas duas áreas de estudo, a área de intervenção do projeto e a área testemunha tem seus resultados demonstrados no Gráfico 1. Dos sessenta (60) pontos plotados na área de estudo, trinta (30) foram escolhidos aleatoriamente, dentro da área de intervenção, ao passo que os demais foram selecionados aleatoriamente na área testemunha.

Com base nos parâmetros utilizados para este tipo de análise, denominados preditores (NDVI, SAVI e SFDVI), conclui-se que nove (9) dos trinta (30) pontos selecionados na área de intervenção foram classificados como sendo da área testemunha, onde não houve intervenção. Se esperava esse comportamento, levando em consideração que a imagem data de 2012, ano de implementação do projeto; ou seja, a FUNCEME ainda não havia realizado as técnicas de recuperação da área. Em decorrência disso, torna-se natural que os pontos da área de intervenção se confundam com os pontos da área testemunha.

Dos trinta (30) pontos selecionados aleatoriamente na área testemunha, onze (11) foram classificados como sendo da área de intervenção, o que significa que houve 63% de acerto no grupo de pontos da área testemunha, pois dezenove (19) pontos dessa área foram classificados corretamente, como sendo da área testemunha, enquanto que na área de intervenção houve 70% de acerto, considerando que vinte e um (21) dos pontos classificados como área de intervenção pertenciam efetivamente a esta área.

Gráfico 2 – Análise Discriminante I



4.2 Análise Discriminante 2: 2016 - Ano de Finalização do Projeto

Através da imagem Plêiades capturada em 10 de julho de 2016 se pode observar um outro tipo de padrão no gráfico da análise discriminante (Gráfico 2), que ocorre devido à sazonalidade caracterizada da região. Dos trinta (30) pontos selecionados na área de intervenção, dezesseis (16) foram classificados corretamente, enquanto quatorze (14) pontos foram classificados como área testemunha. Dos trinta (30) pontos plotados na área testemunha, dezessete (17) foram classificados corretamente, sendo que treze (13) foram classificados como sendo da área de intervenção.

Os dados demonstram que houve um acerto de 53,3% no grupamento de pontos da área de intervenção e 56,7% de acerto na discriminação, dentre os pontos da área testemunha. Consequentemente, tem-se uma acurácia de 55,5%, considerando que apenas trinta e três (33) dos sessenta (60) pontos foram considerados certos.

Como se pode observar através do gráfico abaixo, os pontos se encontram mais dispersos em relação ao gráfico de 2012, e este padrão de espalhamento é explicado de

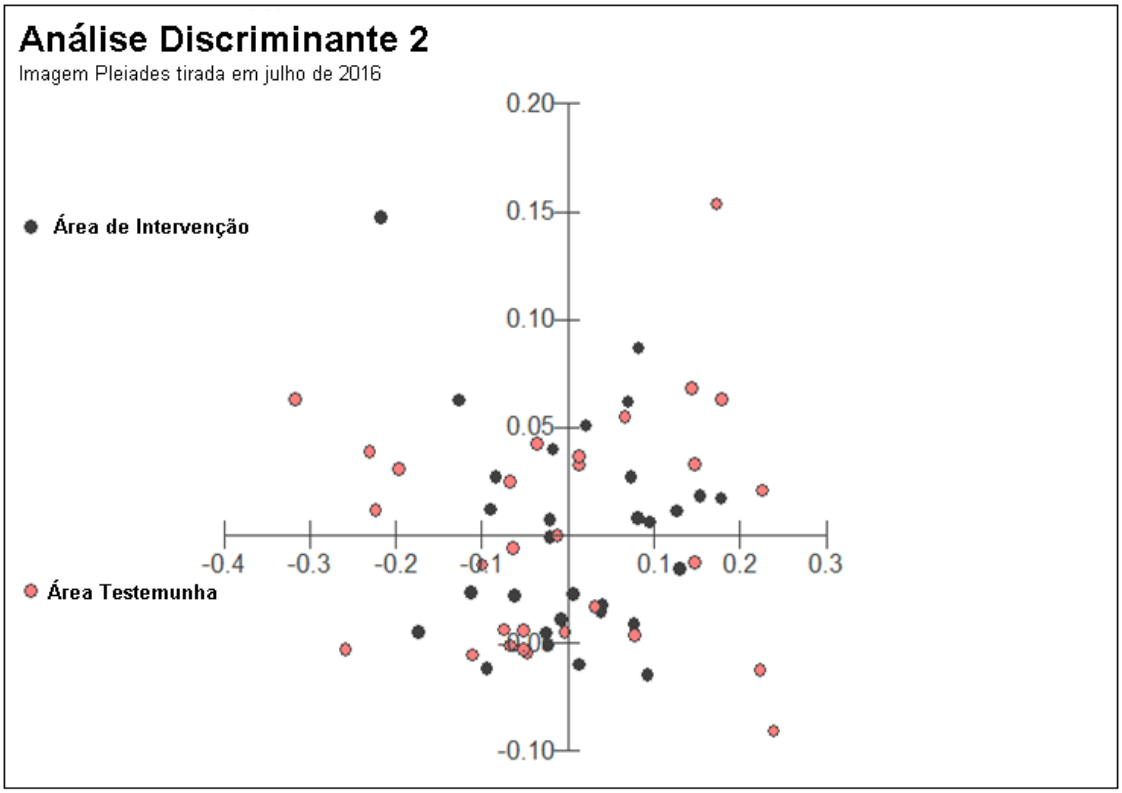
acordo com a climatologia da região. Conforme foi descrito anteriormente, o município de Jaguaribe possui duas estações bem demarcadas, sendo elas, úmida e seca.

A estação chuvosa ocorre no primeiro semestre do ano e é subdividida em pré-estação chuvosa, correspondente ao mês de janeiro, e a quadra chuvosa, correspondente aos meses de fevereiro, março, abril e maio. O mês de julho dá início à estação seca, período em que a vegetação perde as folhas e adquire um aspecto seco e raleado. O comportamento espectral da vegetação nesta época de escassez hídrica se confunde com o comportamento espectral de solo devido à perda das folhas que são responsáveis pela resposta fotossintética.

Apesar da imagem Plêiades ter sido capturada quatro anos após a implementação do Projeto Brum, em uma época na qual a vegetação se confunde com o solo exposto, diferentemente da imagem de 2012, que foi capturada em fevereiro, mês da quadra chuvosa. A vegetação pode ser classificada como degradada mesmo não sendo, pois cumpre o ciclo comportamental característico da vegetação do bioma Caatinga. É importante ressaltar que nos três anos de monitoramento do projeto – 2014, 2015 e 2016 – as chuvas acumuladas na bacia do riacho do Brum ficaram abaixo do normal climatológica (RELATÓRIO, 2016), sendo 2016 o ano mais seco, com chuvas 50,1% abaixo da média normal climatológica.

Por esta razão, de acordo com a análise discriminante e o período sazonal que se encontrava a área de estudo, os pontos coletados na área de intervenção confundiram-se com os pontos da área onde não houve intervenção (área testemunha).

Gráfico 3 – Análise Discriminante II



4.3 Análise Discriminante 3: 2019 - Sete Anos Após a Implementação do Projeto

Após o encerramento do Projeto Brum a FUNCEME não mais adquiriu imagens pagas de alta resolução; os processamentos foram feitos em uma imagem CBERS com resolução de 10 metros reamostrados para 5 metros a partir da fusão da banda pancromática, este aspecto foi de extrema relevância na interpretação do terceiro gráfico de análise discriminante (Gráfico 3).

A partir das funções discriminantes de Fisher aplicadas sobre os trinta (30) pontos da área de intervenção e sobre os trinta (30) pontos da área testemunha, foram obtidos os seguintes resultados: vinte e um (21) pontos selecionados aleatoriamente na área de intervenção foram classificados corretamente, como sendo de fato pertencentes à área de intervenção, ao passo que os nove (9) pontos restantes foram classificados como sendo da área onde não houve intervenção; assim, na área de intervenção, foi verificado acerto de 70% no grupamento de pontos.

Na área testemunha, vinte e dois (22) pontos dentre os trinta (30) pré-estabelecidos como sendo desta área foram classificados como verdadeiramente pertencentes à área

onde não houve intervenção, e apenas oito (8) pontos foram classificados como sendo do outro grupamento, caracterizando um total de 73,3% de acerto na classificação dos pontos na área testemunha.

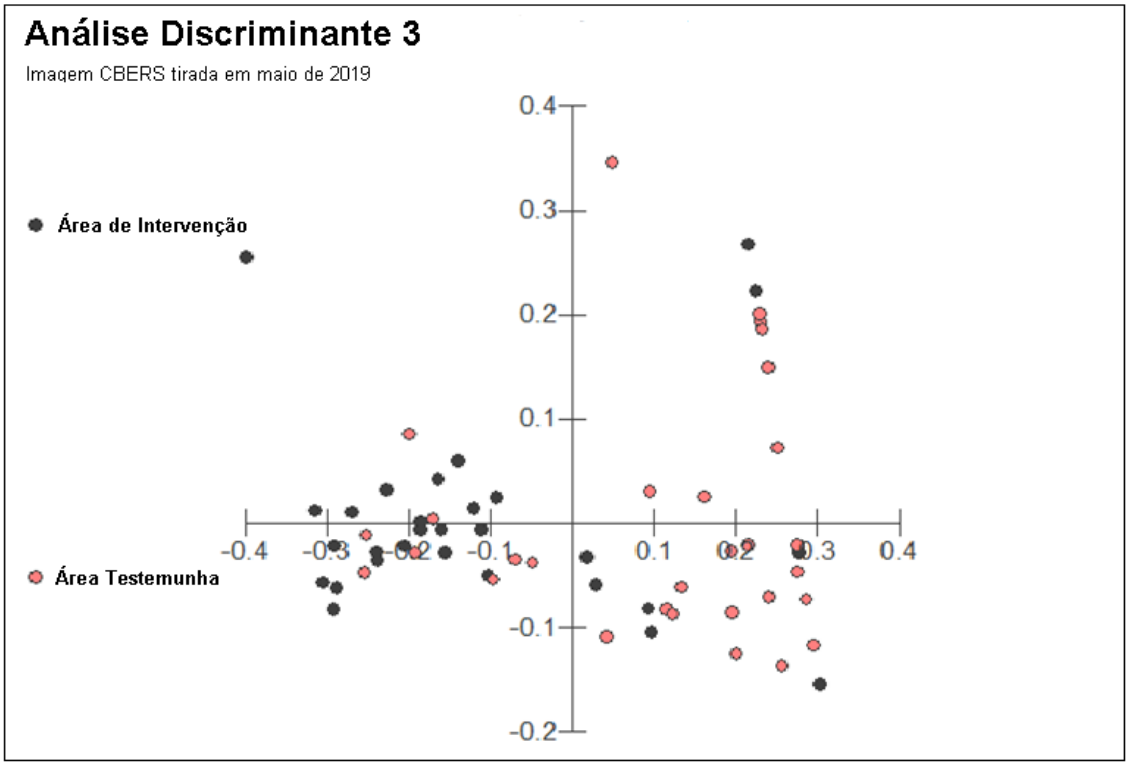
Correlacionando os três resultados, a imagem CBERS, capturada sete anos após a implementação do projeto no riacho do Brum, foi a que obteve uma maior acurácia nos dados (71,7%) e maior diferenciação entre a área de intervenção e a área testemunha. Nos três gráficos da análise discriminante a área à esquerda do eixo y é representada pela área de intervenção e a área a direita do eixo y é definida pela área testemunha.

Como se pode observar no gráfico de 2019, os pontos foram diferenciados de maneira explícita, o que não ocorreu nos dois casos anteriores, nos quais se deu a confusão de dados. Percebe-se que a maioria dos pontos pretos (pontos pré-definidos como sendo da área de intervenção) se localizam à esquerda do eixo "y", o que significa que realmente pertencem à área de estudo onde houve intervenção, enquanto os pontos de cor rosa (representados pelos pontos pré-definidos como sendo da área testemunha) estão em sua maioria localizados à esquerda do eixo "y", significando que são verdadeiramente pontos da área testemunha.

Com base nessa análise, percebe-se a diferenciação dos pontos da área de intervenção em relação aos pontos da área onde não foi processada a intervenção, e isso significa que os pixels selecionados na área de intervenção tiveram resposta espectral em relação a vegetação. Por outro lado, os pixels da área testemunha continuaram com o mesmo padrão degradado, decorrente do processo de desertificação.

Apesar da imagem CBERS não adquirir a mesma resolução espacial que as imagens Quickbird e Plêiades, ela foi capturada no mês de maio, mês de quadra chuvosa, ou seja, na mesma estação que a imagem de 2012, tornando-se uma boa ferramenta de comparação de evolução em relação ao ano de implementação do projeto. Esse resultado é bem demarcado pela diferenciação dos pontos das duas áreas de estudo, e demonstram a eficiência do Projeto Brum em relação ao processo de recuperação da área degradada.

Gráfico 4 – Análise Discriminante III



CONCLUSÃO

O grande agravador do processo de desertificação é a ação antrópica que exerce pressão em solos de caráter suscetível. Diante disto, as práticas de manejo são imprescindíveis em áreas como a considerada no presente estudo, de maneira que não haja a degradação dos recursos na região. Qualquer projeto que tenha como objetivo recuperar uma área degradada, a exemplo do projeto de recuperação da área degradada da Sub-bacia do Riacho do Brum, instaura a necessidade de monitoramento, como ferramenta de acompanhamento da evolução do que foi realizado.

Quanto mais automatizado for o referido monitoramento mais eficiente será a avaliação do objeto. Por isso, o sensoriamento remoto supre a demanda favoravelmente. A partir das imagens de satélite torna-se possível analisar diversos alvos e aspectos do planeta, sem que seja imprescindível a análise de campo. Assim, o sensoriamento remoto apresenta-se como um procedimento importante no monitoramento e, consequentemente, na verificação da eficiência de determinado projeto.

A partir das imagens Quickbird, Plêiades e CBERS o presente estudo demonstrou que é possível monitorar a revegetação e acompanhar a evolução de recuperação de uma área pequena, com a utilização de índices espectrais de vegetação. De acordo com as análises discriminantes aplicadas, como ferramenta de comparação entre a vegetação da área onde se deu intervenção e a vegetação da área onde está não ocorreu, pode-se comprovar a diferenciação da cobertura vegetal das duas áreas, demonstrando que as técnicas de manejo aplicadas pelo Projeto de Recuperação da Área Degradada em Processo de Desertificação na Sub-bacia Hidrográfica do Riacho do Brum no Município de Jaguaribe foram bem sucedidas.

A padronização dos dados é extremamente importante para um monitoramento eficaz, contudo, é importante ressaltar que as imagens utilizadas devam ter a mesma resolução espectral, espacial e radiométrica; possuam o mesmo intervalo temporal entre elas; e sejam obtidas na mesma estação do ano. Esse tipo de padronização de informação se faz necessária quando o objetivo central é a comparação ao longo dos anos.

Sugere-se que sejam realizadas novas pesquisas contemplando todos os alvos da área, ou seja, que não se restrinjam apenas ao alvo vegetação, visando colaborar com o monitoramento de regiões que estão sendo recuperadas.

Finalmente, tomando como base a literatura mencionada ao longo do texto e a avaliação das imagens referentes ao projeto de recuperação de área degradada que foi

executado pela FUNCEME, é possível afirmar que o uso do sensoriamento remoto contribui de forma decisiva para o monitoramento dos ambientes, bem como para a escolha e adoção de técnicas de manejo eficientes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R.A. Províncias estruturais brasileiras**.** In: *VIII Simp. Geol. Nordeste*. Campina Grande: Atlas, 1977.

BAPTISTA, G. M. M. Aplicação do Índice de Vegetação por Profundidade de Feição Espectral (SFDVI – Spectral Feature Depth Vegetation Index) em Dados RapidEye. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. João Pessoa, 2015.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Nova delimitação do semi-árido brasileiro.** Brasília: 2005.

BRASIL. **Programa de Ação Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca / PAE-CE**. Fortaleza, Governo do Estado do Ceará.

CAVALCANTE, J. C. **Limites e evolução geodinâmica do sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil.** Natal, 1999.

CROSTÁ, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. 2ed.** Campinas – SP: UNICAMP, 2002.

FERREIRA, D.G. et al. **A desertificação no Nordeste do Brasil:** diagnóstico e perspectiva. Teresina: Universidade Federal do Piauí/ Núcleo de Pesquisa e Controle da Desertificação Nordeste – DESERT, 1994.

FUNCEME. Fundação Cearense de meteorologia e Recursos Hídricos. **Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará / Funceme.** Fortaleza, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente:** Uma Perspectiva em Recursos Terrestres, 2° edição. 2011.

LEITE, F. R. B; OLIVEIRA, S. B. P.; BARRETO, M. M. S.; CARVALHO, G. M. B. S.; FILHO, M. R. F. Degradação Ambiental e Susceptibilidade aos Processos de Desertificação na Região do Médio Jaguaribe – CE. *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2003.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade:** caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**, 2001.

MINISTÉRIO do Meio Ambiente. **Atlas das Áreas Susceptíveis à Desertificação no Brasil.** Brasília: MMA, 2007.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa - MG: UFV, 2003.

NOVO, E. M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 3ed. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, M. B. L. O. et. al. Trocas de Energia e Fluxo de Carbono entre a Vegetação de Caatinga e Atmosfera no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2006.

PASSOS, P. N. C. A Conferência de Estocolmo Ponto de Partida para a Proteção Internacional do Meio Ambiente. *Revista Diretos Fundamentais & Democracia.* Volume 6, 2009.

ROSA, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto. 7° edição, 2009.

SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S**. Panorama da Desertificação no Nordeste do Brasil. São Luis – MA**. São Luís: UFMA, 2016.

SOUZA, A. M. O. de Souza. SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TIPOLOGIAS FLORESTAIS A PARTIR DE IMAGENS QUICKBIRD**.** *IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal*. 2010.

THORNTHWAITE, C. W. **Atlas of climatic types in the United States 1900-1939.** U.S.D. Misc. Publ. Nº. 421, 5 pp. 95 plates. 1941.