

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**CÁSSIA ROBERTA DE MELO LEITE**

**MODELOS DE ÍNDICE DE UMIDADE DO SOLO OBTIDO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO NO SERTÃO PERNAMBUCANO**

**RECIFE – PE**

**2016**

**CÁSSIA ROBERTA DE MELO LEITE**

**MODELOS DE ÍNDICE DE UMIDADE DO SOLO OBTIDO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO NO SERTÃO PERNAMBUCANO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

**Orientador: Fabrício Marcos Oliveira Lopes**

**Coorientadora: Magna Soelma Beserra de Moura**

**RECIFE – PE**

**2016**

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

L533m Leite, Cássia Roberta de Melo  
Modelos de índice de umidade da superfície do solo obtida por  
sensoriamento remoto do sertão pernambucano / Cássia Roberta de  
Melo Leite . – 2016.

62 f. : il.

Orientador: Fabrício Marcos Oliveira Lopes .  
Coorientada: Magna Soelma Beserra de Moura .  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Ambiental, Recife, BR-PE, 2016.

Inclui referências.

1. Desertificação 2. Satélite ambiental 3. Semiárido I. Lopes,  
Fabrício Marcos Oliveira, orient. II. Moura, Magna Soelma Beserra  
de, coorient. III. Título

CDD 628

**MODELOS DE ÍNDICE DE UMIDADE DO SOLO OBTIDO POR  
SENSORIAMENTO REMOTO DO SERTÃO PERNAMBUCANO**

**Dissertação defendida em 31 de agosto de 2016 pela banca examinadora:**

**Orientador:**

---

**Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes**

**Examinadores:**

---

**Prof. Dr<sup>a</sup>. Cristina Rodrigues Nascimento**  
Examinador externa

---

**Prof. Dr. Vicente de Paula Silva**  
Examinador interno

*Dedico,  
A Deus;  
Aos meus pais;  
A minha avó;  
Aos meus irmãos;  
E a minha sobrinha.*

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, por permitir que fosse possível a força de persistir nos nossos objetivos e sonhos.

A minha mãe, Luciana Melo, minha avó, Maria de Lourdes, meus irmãos, Cintia Melo e João Leonardo pelo amor, carinho e apoio durante os momentos em que estive longe e não me deixaram fraquejar.

Ao meu orientador, Fabrício Marcos Oliveira Lopes, pela sua orientação, contribuição, construção de conhecimento e incentivo na realização da pesquisa, por acreditar em minha capacidade.

Aos meus amigos, que me ajudaram nos momentos de estudo e compreensão durante a jornada da Pós-graduação.

A todos que fazem parte do Programa de Pós-graduação de Engenharia Ambiental, coordenadores, professores, secretárias e alunos, pelo apoio e suporte na construção de todas as atividades relacionada à pesquisa.

Ao INMET, UACA/UFCG e a NASA por disponibilizar dados meteorológicos, climatológicos e produtos do satélite Terra sensor MODIS.

A FACEPE, por disponibilizar recursos para a realização dos trabalhos.

E, por fim, a todos aqueles que se disponibilizaram a cooperar para a efetivação deste trabalho.

*O meu eterno agradecimento, à todos!*

## RESUMO

Em regiões semiáridas, o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas estão diretamente ligados à quantidade de água disponível no solo a partir de precipitação e/ou irrigação. A avaliação precisa da umidade do solo é difícil de ser executada por meio de medidas de campo porque os métodos típicos de campo são complexos e caros. Este trabalho teve como objetivo principal elaborar modelos de regressões múltiplas do índice de umidade da superfície do solo utilizando imagens do sensor MODIS e dados meteorológicos (Precipitação (mm); Temperatura média do ar (C°); Temperaturas máxima e mínima do ar (°C); Insolação (horas); Evaporação (mm); Umidade relativa do ar (%); Velocidade do vento (km/h) de Ouricuri e Arcoverde pertencentes à mesorregião do Sertão pernambucano para os anos de 2006 e 2012. Além disso, realizou-se o zoneamento do índice de aridez para identificar os municípios onde estão presentes núcleos de aridez e correlacionar o índice de umidade do solo com variáveis meteorológicas e biofísicas. A técnica de interpolação por inverso do quadrado da distância foi aplicada para espacializar o índice de aridez utilizando-se dados de precipitação e de temperatura do ar de 1911 a 1990 medidos em 82 postos meteorológicos. Um total de 44 imagens de índice de vegetação e 88 de temperatura da superfície obtidos do sensor MODIS/Terra foram utilizados para obter o índice de umidade do solo. As imagens de índice de vegetação por diferença normalizada foram classificadas para quantificar e avaliar as áreas de uso e cobertura do solo. Os resultados mostraram que a classe de proteção da cobertura vegetal alta desapareceu de 2006 a 2012, seguida de um aumento das áreas de baixa cobertura vegetal. Observaram-se, ainda, tendências de formações de núcleos de aridez nos municípios de Arcoverde, Sertânia, Igaraci, Afogados da Ingazeira, Ingazeira, Carnaíba e Tabira, pois apresentaram índice de aridez no limite de regiões semiáridas. Concluiu-se que o índice de umidade do solo relacionou-se linearmente muito bem com o NDVI e a Ts obtidas dos produtos do sensor MODIS para o município de Arcoverde - PE. A relação entre o índice de umidade do solo com evaporação e velocidade do vento foi moderadamente, porém inversa. Os modelos de regressões múltiplas podem ser utilizados para estimar do índice de umidade da superfície do solo a partir de dados meteorológicos dos municípios de Ouricuri - PE e Arcoverde - PE para os anos de 2006 e 2012.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desertificação, Satélite ambiental, Semiárido, parâmetros biofísicos

## ABSTRACT

In semi-arid regions, growth and productivity of agricultural crops are directly linked to the amount of water available from rainfall and / or irrigation. The accurate assessment of soil moisture is difficult to be performed by means of field measurements because the typical field methods are complex and expensive. This work aimed to develop models of multiple regressions of the soil surface moisture content using images from the MODIS sensor and meteorological data (rainfall (mm), mean air temperature (C °), maximum temperature and minimum air (° C ), sunshine (hours) Evaporation (mm), relative humidity (%) wind speed (km / h) Ouricuri and Arcoverde belonging to the middle region of Pernambuco Hinterland for the years 2006 and 2012. it also held -if the zoning of the aridity index to identify the cities where there are clusters of aridity and correlate the soil moisture content with weather and biophysical variables. the inverse interpolation technique of the square of the distance was applied to spatialise the aridity index using data of precipitation and air temperature from 1911 to 1990 measured at 82 weather stations. a total of 44 vegetation index images and 88 temperature of the obtained surface of MODIS / Terra were used to obtain the moisture content from soil. The normalized difference vegetation index images were classified to quantify and assess the areas of land use and land cover. The results showed that the high vegetation protection class disappeared from 2006 to 2012, followed by an increase in areas of low vegetation cover. They observed also trends of aridity core training in the cities of Arcoverde, Sertânia, Igaraci, Afogados da Ingazeira, Ingazeira, Carnaíba and Tabira, as presented aridity index at the boundary of semi-arid regions. It was concluded that the soil moisture content was related linearly very well with NDVI and Ts obtained from MODIS products for the city of Arcoverde - PE. The relationship between soil moisture content by evaporation and wind speed was moderate, but reversed. The models of multiple regressions can be used to estimate the moisture content of the soil surface from meteorological data from the municipalities of Ouricuri - PE and Arcoverde - PE for the years 2006 and 2012.

**KEYWORDS:** Desertification, Environmental Satellite, Semi-Arid , biophysical parameters



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 -</b>	Municípios da mesorregião do sertão de Pernambuco.....	28
<b>Figura 2 -</b>	Textura média dos solos da mesorregião do sertão de Pernambuco.....	29
<b>Figura 3 -</b>	Declividade do terreno (%) da mesorregião do Sertão de Pernambuco.....	30
<b>Figura 4 -</b>	Empresa de extração do mineral para a fabricação de gesso em Ouricuri e produção de gesso em Araripina– PE.....	31
<b>Figura 5 -</b>	Precipitação pluviual acumulada de 15 dias para a estação meteorológica automática de Arcoverde para os anos de 2006 e 2012.....	32
<b>Figura 6 -</b>	Carta do índice de aridez climatológico para delimitação das áreas suscetíveis à desertificação (1911 – 1990) para a mesorregião do Sertão Pernambucano.....	39
<b>Figura 7 -</b>	Carta do índice de aridez climatológico de acordo com a deficiência e excesso hídricos nos meses de verão e inverno de 1911 a 1990 para a mesorregião do Sertão Pernambucano.....	40
<b>Figura 8 -</b>	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da mesorregião do sertão pernambucano, comparação para anos de 2006 e 2012.....	42
<b>Figura 9 -</b>	Ciclo sazonal do NDVI para a localização da estação meteorológica automática de Arcoverde – PE para 2006 e 2012.....	43
<b>Figura 10 -</b>	Fração de solo coberto por vegetação (FC) da mesorregião do sertão pernambucano para 2006 e 2012.....	43
<b>Figura 11 -</b>	Índice de área foliar (IAF) da mesorregião do sertão pernambucano para 2006 e 2012.....	44
<b>Figura 12 -</b>	Fator de crescimento da cobertura vegetal (%) para a mesorregião do Sertão pernambucano para os anos de 2006 e 2012.....	45
<b>Figura 13 -</b>	Temperatura do solo (°C) da mesorregião do sertão de Pernambuco para os anos de 2006 e 2012.....	46
<b>Figura 14 -</b>	Relação linear entre temperatura da superfície (Ts, °C) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a estação automática de Arcoverde-PE para os anos de 2006 e 2012.....	47
<b>Figura 15 -</b>	Índice de umidade do solo da mesorregião do sertão de Pernambuco para 2006 e 2012.....	48
<b>Figura 16 -</b>	Relação linear entre índice de umidade do solo e NDVI (a) e Ts (b) para a localização da estação meteorológica automática de Arcoverde – PE para 2006 e 2012.....	49
<b>Figura 17 -</b>	Variabilidade temporal do índice de umidade do solo (IUS) e o NDVI (a) para os locais das estações meteorológicas automáticas de Arcoverde (a e b) para 2006 e 2012.....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 -</b>	Especificações Técnicas do Sensor MODIS.....	26
<b>Tabela 2 -</b>	Tipos climáticos baseados no índice de aridez segundo Thornthwaite (1948) e Thorntwaite e Mather (1955).....	32
<b>Tabela 3 -</b>	Grau de aridez segundo Thornthwaite (1948) e Thorntwaite e Mather (1955).....	33
<b>Tabela 4 -</b>	Classificação dos intervalos do NDVI para 2006 e 2012.....	34
<b>Tabela 5 -</b>	Coefficiente de correção estatística ou coeficiente de correção de Pearson.....	37
<b>Tabela 6 -</b>	Distribuição absoluta e relativa dos valores de NDVI na mesorregião do sertão pernambucano, comparação para anos de 2006 e 2012.....	40
<b>Tabela 7 -</b>	Coefficientes do modelo de umidade do solo com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Ouricuri-PE.....	51
<b>Tabela 8 -</b>	Coefficientes do modelo de umidade do solo com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Arcoverde-PE.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS

BHC - Balanço Hídrico Climatológico

E - evaporação

EVI - Índice de vegetação melhorado

FC - Fração de solo coberta pela vegetação

Ia - Índices de aridez

IAF - Índice de área foliar

IUS - Índice de Umidade do Solo

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

N - Insolação

NDVI - Índice de Vegetação por diferença Normalizada

NC - Níveis de cinza

P – Precipitação

REM - Radiação Eletromagnética

T - Temperatura média do ar

Tmax - Temperaturas máxima do ar

Tmin - Temperatura mínima do ar

Ts - Temperatura da Superfície

UR - Umidade relativa do ar

Vv - Velocidade do vento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Definição de desertificação.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Semiárido nordestino.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3. Índice de aridez.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4. Textura e tipos de solos.....</b>	<b>19</b>
<b>3.5. Umidade do solo.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6. Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>23</b>
<b>3.7. Sensor MODIS.....</b>	<b>25</b>
<b>3.8. Produtos do sensor MODIS.....</b>	<b>27</b>
<b>4. MATEIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. Área de estudo.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Aquisição dos dados meteorológicos e climáticos.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3. Análise exploratória dos dados meteorológicos e climáticos.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4. Estimativas de índices de aridez.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5. Aquisição de imagens-produtos do sensor MODIS.....</b>	<b>34</b>
<b>4.6. Pré-processamento das imagens-produtos MODIS na ferramenta         MRTOOL.....</b>	<b>34</b>
<b>4.7. Índice de umidade derivado da temperatura da superfície.....</b>	<b>36</b>
<b>4.8. Índice de umidade do solo derivado do NDVI.....</b>	<b>36</b>
<b>4.9. Índice de umidade da superfície do solo.....</b>	<b>36</b>
<b>4.10. Análise de regressão linear múltipla.....</b>	<b>37</b>
<b>4.11. Análise estatística.....</b>	<b>37</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1. Índice de Aridez.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2. Índice de Vegetação.....</b>	<b>40</b>
<b>5.3. Temperatura da superfície.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4. Índice de Umidade da superfície do solo.....</b>	<b>47</b>

<b>5.5. Análise de regressão linear múltipla.....</b>	<b>50</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em regiões semiáridas, o crescimento e a produtividade das culturas agrícolas estão diretamente ligados à quantidade de água disponível no solo a partir de precipitação e/ou irrigação. Muitos estudos mostraram uma relação linear entre a massa seca das culturas agrícolas e a umidade do solo ao longo da estação de crescimento. A capacidade de quantificar a umidade do solo permite que os pesquisadores estudem a interação da vegetação e seu meio ambiente e também apoiem as atividades de práticas de produção de culturas agrícolas como o planejamento de irrigação.

A avaliação precisa da umidade do solo é difícil de ser executada por meio de medidas de campo porque os métodos típicos de campo são complexos e caros. Além disso, as variações locais nas propriedades do solo, terreno e cobertura vegetal dificultam a escolha de locais representativos de campo, se não impossível (HEMAKUMARA et al., 2007; MERLIN et al., 2012).

As observações realizadas por sensores a bordo de satélites que captam a radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida dos alvos da superfície terrestre é uma solução para o problema da amostragem espacial. As imagens de satélite oferecem a capacidade de produzir medições espacialmente abrangente das condições ambientais de ecossistemas terrestres, em relação as medições pontuais realizadas no campo.

As técnicas de sensoriamento remoto apresentaram vantagem, porque são medidas espaciais explícitas que podem ser adquiridas a custo relativamente baixo, minimizando a quantidade de trabalho de campo e fornecendo dados com maior rapidez. Se variações na emitância medida podem estar relacionadas as condições de umidade do solo, então, podem ser determinadas as variações regionais e de heterogeneidade espacial local das condições de umidade do solo (COURAULT et al., 2005).

A ideia básica do uso de imagens de satélite para estimar umidade do solo é que a umidade do solo afeta as características da superfície que podem ser observadas através de sensoriamento remoto. Estas incluem fatores biofísicos, tais como cobertura vegetal, observadas através de índices de vegetação e o balanço de energia da superfície, observado através da temperatura da superfície. A combinação de temperatura da superfície e índice de vegetação podem fornecer informações úteis para a detecção quantitativa da distribuição espacial e temporal da umidade do solo.

É oportuno o uso dos produtos índice de vegetação e temperatura da superfície do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites Terra

e Aqua como indicadores físicos e biofísicos do bioma Caatinga para monitorar as áreas susceptíveis a desertificação no semiárido brasileiro e complementar os bancos de dados anteriores produzidos com as imagens da série de satélites Landsat. Essas imagens produzidas são composições dos melhores pixels observados em 16 dias corrigidos geograficamente, radiometricamente e dos efeitos dos aerossóis atmosféricos e com ampla cobertura espacial. Adicionalmente, as imagens MODIS permitem monitorar o uso e ocupação da terra e estabelecer relações entre índice de vegetação e temperatura da superfície com a umidade do solo para posteriormente ser estimado o tamanho de áreas degradadas no bioma Caatinga do semiárido brasileiro. As áreas degradadas da Caatinga surgem principalmente pelo uso de práticas agrícolas inadequadas, desmatamentos, mau uso da irrigação, sobre pastejo na criação de animais, queimadas, entre outras, tornando-a cada vez mais semiárida (DANFENG et al., 2006; BEZERRA, et al., 2011). As repetidas e prolongadas secas sobre as áreas degradadas ampliam os efeitos das atividades antropogênicas (SÁ et al., 2010).

Vale ressaltar que a região semiárida do Brasil em particular ainda é carente de informações da dinâmica de água no solo sob diferentes condições de cobertura, e apesar de ser o único bioma brasileiro cujos limites estão restritos ao território nacional, pouca atenção tem sido dada à conservação da diversificada paisagem da Caatinga (BEZERRA et al., 2013). Dentro deste contexto o monitoramento e a modelagem temporal e espacial tornam-se indispensáveis para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e da água, e para quantificar os componentes do balanço hídrico, uma vez que, a disponibilidade de água no solo está diretamente ligada disponibilidade hídrica na atmosfera que é controlada por processos de evaporação e transpiração (SILVA et al., 2015).

Portanto, tendo em vista essas características e buscando avaliar vários fatores ambientais na mesorregião do sertão de Pernambuco, a pesquisa é de grande importância para compreender e diagnosticar os problemas que existem de escassez hídrica na região, além da formação de áreas desertificadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Elaborar modelos de regressões múltiplas do índice de umidade da superfície do solo utilizando imagens do sensor MODIS e dados meteorológicos dos municípios de Ouricuri e Arcoverde pertencentes à mesorregião do Sertão pernambucano.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estimar e avaliar o índice de umidade do solo para a mesorregião do Sertão pernambucano usando imagens do satélite Terra sensor MODIS para os anos de 2006 e 2012;
- Realizar o zoneamento do índice de aridez utilizando o balanço hídrico climatológico dos postos meteorológicos da mesorregião do Sertão pernambucano para identificar os municípios onde estão presentes núcleos de aridez;
- Classificar por fatiamento as imagens de índices de vegetação do sensor MODIS e quantificar e avaliar as áreas de uso e cobertura do solo;
- Relacionar o índice de umidade do solo com os parâmetros índice de vegetação por diferença normalizada e temperatura da superfície da terra para Ouricuri e Arcoverde-PE.



### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

A presente revisão de literatura aborda a importância do estudo das áreas susceptíveis ao processo de desertificação e a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento como ferramenta para estimar índice de umidade da superfície do solo a partir de imagens do sensor MODIS.

#### **3.1. Definição de desertificação**

A Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação conceitua a desertificação como o processo de degradação das terras das regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de diferentes fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas.

Os processos de desertificação nos espaços semiáridos brasileiros começaram a ser formalmente identificados nos anos de 1970. Estudo pioneiro, realizado naquela época pelo ecólogo pernambucano João Vasconcelos Sobrinho, informava que ali estaria a surgir um grande deserto com todas as características ecológicas que conduziriam à formação dos grandes desertos hoje existentes em outras regiões do globo. O deserto que ali vinha se formando seria um deserto atípico, diferenciado do típico deserto saariano, pela incidência de precipitações e natureza do solo, mas com as mesmas implicações de inabitabilidade, disso constituindo prova a diminuição da rede potamográfica da região (SRH, 2014).

Vasconcelos Sobrinho (1978) define desertificação como o processo de degradação progressiva da vegetação, do solo e dos recursos hídricos, resultado de condições climáticas e condições do solo ou ações humanas, ou ambas, levando a destruição do ecossistema primário, redução da produtividade e perda da capacidade de auto recuperação do solo.

Para Mainguet (1992) a desertificação é revelada pela seca que se deve as atividades humanas quando a capacidade de carga das terras é ultrapassada, ela procede de mecanismos naturais que são acelerados ou induzidos pelo homem e se manifesta através da degradação da vegetação e dos solos e provoca na escala humana de uma geração, uma diminuição ou destruição irreversível do potencial biológico das terras e de sua capacidade de sustentar suas populações.

Os estudos de Ferreira et al. (1994) indicam que o processo de desertificação na região semiárida brasileira vem comprometendo seriamente uma área de 181.000 km<sup>2</sup>, com a geração de impactos difusos e concentrados sobre o território. Nas áreas onde ocorrem os

impactos difusos, os danos ambientais produzidos resultam em erosão dos solos, empobrecimento da Caatinga e degradação dos recursos hídricos, com efeitos diretos sobre a qualidade de vida da população. Já nas áreas onde os efeitos estão concentrados em pequena parte do território, os danos ocorrem com profunda gravidade, configurando o que se chama de Núcleo de Desertificação.

Sampaio & Sampaio (2002) afirmam que a desertificação é um processo dinâmico, com uma cadeia de eventos frequentemente fechada em ciclos viciosos. Assim, alguns eventos podem ser a causa inicial do processo, mas dão lugar a consequências que podem retroalimentar as causas originais.

Reis (2006) afirma que a desertificação gera e acentua a escassez de recursos naturais vitais para a sobrevivência humana como, água potável, solo agrícola e vegetação. A escassez de água potável, de recursos piscícolas, de recursos florestais e de solo agrícola, serão a causa próxima da provável desordem social que se irá acentuar num futuro próximo nos países em desenvolvimento; onde estes fenômenos terão maior impacto devido à incapacidade dos próprios estados para lhes fazer face.

Para Barros (2010) a desertificação tem sido considerada por muitos estudiosos, ambientalistas e inclusive pelo poder público, um dos mais graves problemas ambientais da atualidade. Os efeitos de tal processo atingem a ordem política, econômica, social, cultural e ambiental, o que implica envolvimento de diversos profissionais advindos de diferentes áreas do saber, ou seja, desde aqueles envolvidos com o quadro ambiental, perpassando por analistas do quadro econômico e social.

A problemática da origem da desertificação faz-se referente a diversos fatores, como os atribuídos aos fatores físicos, biológicos, como também aqueles que englobam as questões políticas, sociais, culturais e econômicas. Além desses fatores, temos as ações predatórias do homem na exploração agrícola, onde causa o empobrecimento do solo que limita o crescimento da cobertura vegetal, o que permite o processo de erosão do solo, fato esse determinante para ocorrência do processo de desertificação. Com relação às ações causadoras da desertificação, uma das considerações que vem sendo abordada refere-se à capacidade que essas ações carregam. O termo desertificação é então utilizado, para definir a transformação de um solo muito arenoso e com fraco desenvolvimento da cobertura vegetal, em uma área de clima árido que apresenta mais evapotranspiração do que a precipitação (ALMEIDA, 2012).

A ação humana, por meio de atividades agropecuárias, mineradoras, queimadas e do desmatamento, tem provocado a desertificação de grandes áreas na região Nordeste do Brasil.

O estágio atual de desertificação no Nordeste é grave. A recuperação por meio de métodos criados pelo homem é possível, mas tem alto custo.

No Brasil, as áreas mais susceptíveis localizam-se na região semiárida do Nordeste, numa área que ultrapassa 900 mil km<sup>2</sup>, onde vivem cerca de 18 milhões de pessoas, 42% da população nordestina e 11% da população do Brasil (IBGE, 2003). Essa região caracteriza-se por altas taxas de evapotranspiração, ocorrência de períodos de secas, solos de pouca profundidade e reduzida capacidade de retenção de água, o que limita consequentemente seu potencial produtivo. Todos esses elementos conjugados evidenciam um ecossistema muito frágil, o qual se agrava principalmente devido à degradação da cobertura vegetal e do uso incorreto das terras, através da exploração predatória da caatinga, dos desmatamentos e queimadas (SILVA, 2009).

O estado de Pernambuco divulgou, em dezembro de 2003, o documento detalhando sua Política Estadual para o Controle da Desertificação, cujo objetivo geral é alcançar o desenvolvimento sustentável nas áreas sujeitas à seca e à desertificação no estado. Especificamente, essa política tem como objetivos: i) contribuir para a formulação das políticas de uso sustentável dos recursos naturais das regiões do Agreste e do Semiárido; ii) contribuir para a melhoria da produtividade e produção agrícola nas áreas susceptíveis à seca e à desertificação; iii) contribuir para a redução da vulnerabilidade e para a melhoria da qualidade de vida das populações residentes nas áreas susceptíveis à seca e à desertificação; iv) articular ações setoriais do governo com vistas à sinergia dos processos de planejamento; e v) contribuir para a melhoria da capacidade de enfrentamento dos problemas da desertificação e da seca por parte das populações locais (PERNAMBUCO, 2003).

Dentre as ferramentas utilizadas para estudar as áreas atingidas pela desertificação, se destaca o Sensoriamento Remoto, devido à possibilidade de informações geradas e confiança nos resultados obtidos, além da capacidade de uma análise espaço-temporal e do desenvolvimento de modelos para estudos do processo. Aliado ao sensoriamento remoto, Silva et al (2009) destacam os sistemas de Informações Geográficas (SIG) que podem ser usados para estabelecer correlações espaciais e modelagens diversas para dados os mais variados como os provenientes de indicadores dos processos de desertificação. A integração de dados em um único banco de dados e a possibilidade de apresentar os resultados da análise dos processos de desertificação na forma de mapas são vantagens adicionais oferecidas por um SIG.

### **3.2. Semiárido nordestino**

As características fisiográficas do semiárido brasileiro são tidas como responsáveis pela suscetibilidade natural dessa região ao processo de desertificação. Por isso, geralmente as causas do processo são atribuídas às características do clima e às classes de solo existentes. No entanto, observa-se que as principais causas da desertificação estão atreladas à ação humana, em virtude do manejo inadequado dos recursos naturais do ecossistema caatinga (SOARES, 2010; FEITOSA e ARAÚJO, 2013).

O semiárido nordestino é caracterizado pela ocorrência de diversas variáveis que se associam à desertificação, dentre as quais destacam-se: os baixos índices pluviométricos, a irregularidade das precipitações no tempo e no espaço; a ocorrência de ventos quentes e secos; a intermitência sazonal das drenagens; a forte incidência de radiação solar; a baixa capacidade de retenção de água; a antiga e intensa ocupação da terra; a utilização de técnicas rudimentares de uso do solo; e a marginalidade cultural, política e econômica de sua população (GALVÃO & SAITO, 2003).

Em uma perspectiva geral as áreas semiáridas têm no período seco características comuns às zonas áridas, pois é nesse período climatológico que é identificado, devido à falta, limitação ou a desequilibrada distribuição pluviométrica nos períodos chuvosos. Pressupõe, portanto, que os ecossistemas e os sistemas econômicos podem resistir a uma diminuição da precipitação em 40%, durante um ano, mas serão afetados, seriamente, quando o fenômeno se repetir durante dois anos em sequência (COLVILLE, 1987).

### **3.3. Índice de aridez**

A aridez é a característica do clima que relaciona a insuficiência de precipitação adequada para manter uma vegetação. O grau de aridez de certa região depende da quantidade de água proveniente da precipitação e da perda máxima possível de água através da evaporação e transpiração ou Evapotranspiração Potencial (FERNANDES et. al., 2009).

O grau de aridez de uma região para outra é muito variável, havendo aquelas classificadas como hiperáridas, onde a umidade é muito baixa durante todo ano e outras consideradas apenas áridas com chuvas esporádicas e, ainda, outras áreas semiáridas, quando a estação úmida é curta, de três a quatro meses por ano, permitindo o desenvolvimento de culturas de ciclo vegetativo curto, situação esta mais próxima da realidade do semiárido brasileiro (ANDRADE, 1999).

O índice de aridez é calculado pela diferença entre a quantidade de chuva e a perda de água do sistema (evapotranspiração) e é utilizado para diagnosticar áreas vulneráveis a desertificação. É um índice de relevante utilização nos estudos não só de áreas áridas, semiáridas e subúmidas secas.

A definição de aridez deriva de metodologia desenvolvida por Thornthwaite, C. W. A fórmula por ele desenvolvida para calcular o índice foi revista com o objetivo de contribuir para a elaboração do Mapa Mundial de Distribuição das Regiões Áridas. Conforme essa definição, o grau de aridez de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva (P) e da perda máxima possível de água através da evaporação e transpiração (ETP), ou a Evapotranspiração Potencial.

A importância da determinação deste índice para a desertificação está no fato da ocorrência deste processo se limitar a áreas secas, e o cálculo deste índice indica exatamente esta condição climática. O índice de aridez é considerado de grande precisão na determinação das áreas vulneráveis à desertificação, já que é o único que utiliza variáveis quantitativas para tal análise (SAMPAIO, 2003).

### **3.4. Textura e tipos de solos**

O solo é um corpo de material inconsolidado que cobre a superfície terrestre emersa, entre a litosfera e a atmosfera. Os solos são constituídos de três fases: sólida (minerais e matéria orgânica), líquida (solução do solo) e gasosa (ar). É produto do intemperismo sobre um material de origem, cuja transformação se desenvolve em um determinado relevo, clima, bioma e ao longo do tempo.

O solo arenoso possui cerca de 70% de areia em relação ao total de partículas sólidas. Apresenta poros grandes entre os grãos de areia pelos quais a água e o ar circulam com relativa facilidade. Por isso, nos solos arenosos em geral o escoamento de água através dos poros costumam ser rápido e secam rápido após as chuvas. Nesse escoamento, a água pode levar consideravelmente sais minerais, contribuindo para tornar o solo pobre desses nutrientes (GREENWOOD, 1998).

O solo argiloso possui pelo menos 30% de argila na sua composição de partículas. Esse tipo de solo possui grãos muito pequenos (microporos). Como os espaços entre os grãos, os poros, também são muito pequenos, eles retêm mais água (GREENWOOD, 1998). Assim, o solo argiloso costuma ficar encharcado após uma chuva o que melhora o seu manuseio. Quando está seco e compacto, sua porosidade diminui ainda mais, tornando-o duro e ainda

menos arejado. Possui consistência fina e é impermeável a água e todos os outros líquidos (Portal Brasil, 2016).

O solo de silte tem partículas pequenas e leves e normalmente pode sofrer erosão (desgaste ou arrastamento da terra por ação da água, do vento, de transporte ou de outros agentes). Por isso, não é usado na agricultura. Estradas de terra que soltam muito pó em períodos de seca têm esse tipo de solo (Portal Brasil, 2016).

Por fim, o solo de pedregulho, ou de calcário, é formado por partículas de rochas e, por isso, não é adequado para a agricultura. No entanto, o pó branco ou amarelado retirado dele é usado na agricultura para mudar a acidez do solo em que haverá cultivo. Comum em áreas de deserto, também fornece matéria-prima para a fabricação de cal e cimento (Portal Brasil, 2016).

As definições e as descrições dos tipos de solos mais comuns da mesorregião do Sertão pernambucano são:

Argilossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos (AVA): são solos minerais mais amarelos, com argila de atividade baixa (textura média leve/argilosa) e saturação por bases alta. Esses solos desenvolveram abaixo de caatinga é hiperxerófila e relevo plano (Embrapa, 2006; SRP, 2016). Ocorrem na área localizada entre a Chapada do Araripe e o Rio São Francisco com grande ocorrência nos municípios de Araripina Ouricuri, Santa Cruz da Venerada, Petrolina, Afrânio e Lagoa Grande.

Cambissolo Háplico Eutrófico latossólico (CH): são solos constituídos por material mineral, caracterizados por apresentarem horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos ou Gleissolos. Estes Cambissolos são profundos a muito profundos, essencialmente caoliníticos, sendo considerados intermediários para Latossolos. Desenvolvem-se em relevo ondulado, textura argilosa e abaixo de floresta subcaducifolia (SRP, 2016).

Latossolo Amarelo (LA): São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Nestes solos a textura é média argilosa a argiloso e desenvolveram-se abaixo da caatinga na fase hiperxerófila e em relevo plano. Ocorrem na área localizada entre a Chapada do Araripe e o Rio São Francisco com maior ocorrência nos municípios de Araripina e Trindade (SRP, 2016).

Neossolo Litólico (NL): são solos que apresentam o horizonte A ausente diretamente sobre a rocha, podendo apresentar um C ou Cr seguido de contato lítico dentro dos primeiros

50 cm. É composto por textura média, fase pedregosa, desenvolveram abaixo de caatinga hiperxerófila em relevo ondulado com substrato xisto (Embrapa, 2006). Eles ocorrem, geralmente, na Zona do Sertão, com grande distribuição no Sertão Central e Sertão do Alto Pajeú (SRP, 2016).

Neossolo Quartzarênico (NQ): são solos essencialmente quartzosos, sem contato lítico dentro dos primeiros 50 cm, com sequência de horizontes A-C e textura arenosa até pelo menos 150 cm de profundidade ou até contato lítico. Desenvolveram-se abaixo da caatinga hiperxerófila em relevo plano. Distribuem-se na zona fisiográfica do Sertão (Sertão do São Francisco, Sertão Central e Sertão do Moxotó) abrangendo grandes e contínuas extensões por vários municípios.

Luvissolo Crômico (LC): são solos com B textural, argila de atividade alta e saturação por bases alta, em seqüência a horizonte A fraco ou moderado. Apresenta colorações vivas, predominantemente vermelhas ou avermelhadas que definem o caráter crômico, que determina a sua classificação no nível de sub-ordem (Luvissolo Crômico). Apresentam textura média cascalhenta/argilosa, fase pedregosa, recoberto com caatinga hiperxerófila em relevo suave ondulado (Embrapa, 2006).

Planossolo Nátrico (PN): são solos minerais, imperfeitamente ou mal drenados de textura média/argilosa que se desenvolveram baixo de caatinga hiperxerófila e em relevo plano (Embrapa, 2006).

### **3.5. Umidade do solo**

A umidade do solo é um dos elementos mais relevantes no controle dos processos hidrológicos, visto que exerce influência na geração do escoamento superficial, na evaporação do solo, na transpiração de plantas e em uma série de interações geográficas e pedogênicas; sua aplicação à hidrologia é fundamental, especialmente no que concerne à calibração de modelos de simulação hidrológica distribuídos (ÁVILA et al., 2010).

A umidade do solo representa uma fração de água que está num nível da superfície da terra onde há interação com a atmosfera através da evapotranspiração (KITE & PIETRONIRO, 1996). Ela é extremamente importante, pois está relacionada diretamente com os processos biológicos, ecológicos, hidrológicos e atmosféricos que atuam no ecossistema terrestre (ZHAN et al., 2004; ÁVILA et al., 2010). A umidade do solo controla as magnitudes

relativas dos fluxos de calor sensível e latente da superfície para a camada limite atmosférica, o que pode influenciar a circulação atmosférica (DONG et al., 2007).

A importância da umidade no solo em sistemas agrícolas é notada há muito tempo. O crescimento das plantas e a produtividade das culturas talvez estejam mais proximamente relacionados com a umidade no solo que qualquer outro elemento meteorológico isolado, inclusive a chuva (BAIER & ROBERTSON, 1968). O conhecimento do regime de umidade no solo se reveste de grande importância no fornecimento de informações destinadas a resolver problemas, como manejo de irrigação, escolha da época de plantio, determinação do consumo de água pelas plantas, estudo dos processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera e planejamento dos sistemas de drenagem. Em áreas onde a disponibilidade de água no solo se torna problemática em termos quantitativos, o monitoramento hídrico do solo adquire maior significância. Na região do semiárido nordestino os déficits hídricos ocorrem com bastante frequência, colocando em risco a produção das culturas anuais, em grande parte em regime de sequeiro, onde a adequação da época de plantio a nível de umidade favorável à germinação das sementes é fundamental (AGUIAR, 1997).

O armazenamento de umidade no solo varia com a profundidade do solo, localização geográfica, tipo de vegetação e clima (LIU E AVISSAR, 1999 ; WU E DICKINSON; 2004 ). A umidade do solo armazenada pode variar de menos de um mês na superfície a quatro meses e meio a um metro de profundidade em regiões de latitudes médias e altas em relação as regiões tropicais, devido a alta disponibilidade de radiação solar incidente e a razão entre a evaporação e a precipitação ( WU E DICKINSON , 2004 ). As informações de umidade do solo pode também ser importantes para prever mudanças climáticas, secas e inundações (YEH et al., 1984; PAN et al., 1995).

A umidade do solo tem grande efeito na magnitude da temperatura da superfície (LST) em virtude da sua marcante influência no armazenamento de energia térmica, porém se ressalta que, em larga escala, a umidade do solo ainda não tenha sido bem estudada (LOPES et al., 2011). Além disso, Zhan et al. (2004) observaram que as variações na umidade do solo produzem mudanças significativas no balanço da energia da superfície.

A estimativa da umidade do solo de uma determinada região tem grande importância e aplicabilidade, principalmente para as atividades agrícolas e para o monitoramento dos recursos hídricos renováveis (SAMPAIO, 2012). Sua determinação por dados de



sensoriamento remoto é fundamental para a análise espacial em grandes áreas (LOPES, 2011).

### **3.6. Sensoriamento Remoto**

A origem do sensoriamento remoto nos anos de 1960 deve-se ao espetacular desenvolvimento da área espacial nesses anos, que ficou conhecida como a década da corrida espacial. Foi nesse período que se viu o mais rápido desenvolvimento de foguetes lançadores de satélites, que possibilitou colocar no espaço satélites artificiais para várias finalidades. Os satélites meteorológicos foram os pioneiros e, por meio deles, quase que de uma maneira acidental é que o sensoriamento remoto deu os seus primeiros passos (MENESES, 2012).

Segundo Nicácio (2008) “O sensoriamento remoto é a ciência de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um instrumento que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno em investigação. O sensoriamento remoto pode ainda ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade da proximidade física entre essa superfície e o sensor. Essas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos”.

Com advento do sensoriamento remoto orbital, vários estudos têm utilizado dados orbitais para estimar a distribuição espacial da umidade do solo (ZENG et al., 2004; YICHANG et al., 2010; LOPES et al., 2011; LOPES & MOURA, 2013), representando uma informação complementar para a compreensão da desertificação. Os sensores remotos fornecem informações quantitativas e qualitativas sobre a natureza dos solos e do estado da vegetação continuamente. A integração de dados orbitais e climatológicos em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) têm sido usada para modelar o índice de umidade do solo para auxiliar na caracterizar da desertificação de regiões semiáridas (LIU et al., 2005; SILVA, 2009) e Áridas (DUANYANG et al., 2009).

Câmara & Medeiros (1998) comentam que “O uso de geoprocessamento em projetos ambientais requer o uso intensivo de técnicas de integração de dados e combine ferramentas de análise espacial, processamento de imagens e geoestatística”.

Uma das Geotecnologias utilizadas para fazer o levantamento e conceito de áreas em processo de desertificação é o sensoriamento remoto. Esta ferramenta ajuda a entender o

estado atual e a tendência de desenvolvimento desse processo, além de ministrar dados para pesquisa sobre mecanismos internos, processos atuais e diferenças espaciais e temporais da desertificação (SUN WU, 2000).

O sensoriamento remoto tem como base os processos de interação entre a Radiação Eletromagnética (REM) e os diferentes objetos que se pretende estudar. A esses processos é envolvida a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (GOULART, 2013 apud MORAES, 2002).

Dentre essas divisões do espectro eletromagnético, as mais utilizadas em Sensoriamento Remoto compreendem as faixas do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio, infravermelho distante e microondas. No entanto, as faixas mais utilizadas nessa pesquisa compreendem o vermelho do espectro visível e o infravermelho próximo.

Segundo Souza (2013) “Atualmente, o desenvolvimento do Sensoriamento Remoto permite realizar estudos diferenciados sobre diversas áreas do mundo. Através desta técnica é possível conhecer informações sobre o objeto sem contato físico entre o sensor e o alvo a ser estudado, devido à captação da energia proveniente do objeto e convertida em informações possíveis de análise e interpretação dos alvos. Assim, informações precisas sobre a cobertura do solo, obtidas através de satélites, podem acoplar-se às informações fornecidas a partir de estações meteorológicas para o cálculo proporcionando a estimativa de evapotranspiração para grandes áreas”.

Amorim (2007) fala que se: “ao tomarmos o sensoriamento remoto e o geoprocessamento como olhares, como formas de pensamento acerca do espaço (e, a partir do espaço), nos abrem horizontes para profundas indagações acerca da construção social da realidade. Investigações que revelem esses liames ontológicos/epistemológicos do pensar/representar o espaço, de espacializar/representar os pensamentos.”

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para o acompanhamento das secas (NOBRE et al., 1992) e para delimitar áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no estado do Ceará (SOARES et al., 1992).

O Sensoriamento Remoto, para Carvalho (2001), é sem dúvida, uma ferramenta imprescindível para o monitoramento e controle do processo de desertificação, devido à resolução espaço-temporal dos sensores, a possibilidade de uma maior escala de estudo, além da possibilidade de obtenção de dados de forma gratuita. Ainda, o monitoramento numa abordagem multi escala, permite visualizar o processo como um todo ou porções menores

uma forma dinâmica e compatível com as necessidades de informação e as disponibilidades de tempo e de recursos.

### **3.7. Sensor MODIS**

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) fornece imagens da superfície da Terra com ampla cobertura espacial, espectral e temporal, ideais para estudo de monitoramento do uso do solo. Além disso, produtos de NDVI e Ts do sensor MODIS são distribuídos gratuitamente e corrigidos dos efeitos de atenuação atmosférica e geométrica. A associação de IVDN com Ts em modelos específicos pode ser utilizada para modelar Índice de Umidade do Solo (IUS), importante parâmetro para delimitar áreas em processos de desertificação e aferir sobre o grau de desertificação, contribuindo no entendimento da modificação dos ecossistemas (ZHAN et al., 2004; WANG et al., 2010; ZENG et al., 2010).

Lopes (2013) em seu trabalho diz que “O sensor MODIS fornece imagens da superfície da Terra com ampla cobertura espacial, espectral e temporal, ideais para estudo de monitoramento do uso do solo”.

O sensor MODIS, objeto de estudo desta pesquisa, encontra-se a bordo das Plataformas Espaciais TERRA e AQUA e possui inúmeras vantagens em relação aos satélites e sensores convencionais. A primeira delas é o fato de produtos e imagens serem distribuídos já corrigidos geograficamente e radiometricamente, minimizando a influência de nuvens e aerossóis que muitas vezes interferem na utilização dos produtos orbitais; uma segunda vantagem está no fato desses produtos apresentarem várias opções de resolução espacial (moderada a global); a terceira característica, e talvez mais importante, seja a distribuição gratuita desses produtos ou imagens pela internet. Além de bandas individuais, os usuários podem ter acesso a vários tipos de produtos provenientes do sensor MODIS, que possibilitam pesquisas sobre o Balanço Energético, Cobertura Terrestre, e produtos destinados à Vegetação (ROSENDO, 2005).

O MODIS é um dos cinco instrumentos a bordo do satélite TERRA. É um sensor que foi projetado para obter dados de três campos de estudos diferentes: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e para oferecer uma cobertura global quase diariamente (JUSTICE, 2002).

As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda, cuidadosamente escolhido para a observação de feições das propriedades das nuvens,

dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo (SALOMONSON e TOLL, 1990). Estas especificações têm como objetivo evitar as bandas de absorção atmosférica, além de outras feições (linha de Fraunhoffer), durante a observação e monitoramento da superfície terrestre (SALOMONSON e BARKER, 1992; STRAHLER et al., 1999). As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na tabela 1.

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Sensor MODIS.

Órbita	705 km, heliossíncrona, polar; 10:30h descendente; 13:30h ascendente.
Cobertura espacial	+/- 55°, 2330 km em fileira (“varredura” contínua no nadir no equador)
Resolução espectral	0,4 – 0,14 $\mu\text{m}$
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000m (29 bandas) no nadir
Resolução temporal	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30
Resolução radiométrica	12 bits

**Fonte:** Adaptada de Barker et al. (1992) e Justice et al. (2002).

A quantificação de parâmetros como o Índice de Vegetação por diferença Normalizada (NDVI) e a temperatura da superfície (Ts) nas últimas duas décadas, vem sendo empregada cada vez mais por estudiosos das áreas ambientais, contribuindo com o entendimento das associações entre os fatores que deterioram os ecossistemas do Bioma caatinga (ZHAN et al., 2004). A utilização de imagens de NDVI permite monitorar o desenvolvimento fenológico da vegetação em escala temporal e espacial, auxiliando na avaliação qualitativa e quantitativa dos cultivos em períodos distintos. O resultado pela busca dessas informações gera determinado aperfeiçoamento de tecnologias como o sensoriamento remoto.

Uma das formas de monitoramento em escala global da superfície terrestre se dá a partir da utilização de sensores como o MODIS, que disponibilizam produtos como os Índices de Vegetação, capazes de verificar as modificações no estado da cobertura vegetal, utilizando, para isso, a combinação das bandas do vermelho e infravermelho próximo.

Com o advento de novos sensores orbitais como o MODIS novos resultados serão gerados para monitorar o fenômeno da desertificação em Pernambuco, pois além desse sensor fornecer imagens com resoluções espaciais moderadas, tem-se disponíveis um banco de dados de produtos de temperatura da superfície, índices de vegetal globais até então inexplorado pela comunidade científica nordestina.

### **3.8. Produtos do sensor MODIS**

As imagens do sensor MODIS são utilizadas em algoritmos específicos para produzir imagens-produtos de MOD13 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e MOD11 temperatura da superfície (Ts).

O produto MOD13Q1 é uma composição de 16 dias de imageamento livres de nuvens. Esse produto tem resolução espacial de 250 m e radiométrica de 16 bits. Esse produto possui dois índices de vegetação, o NDVI e o índice de vegetação melhorado (EVI). Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível à variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (HUETE et al., 2002). Esses índices permitem realizar estudos, tanto ao longo do tempo quanto no espaço, sobre as condições da cobertura vegetal, descrevendo e reconstituindo dados de variações fenológicas e discriminando variações interanuais da vegetação nas escalas global e regional (RUDORFF et al., 2007).

O produto MOD11A2 é uma composição de oito dias com resolução espacial de 1000 m, com composição de 8 dias. Essas composições são necessárias para descrever os processos da superfície terrestre, sendo extremamente requisitados para diversos estudos climáticos, hidrológicos, ecológicos e biológicos (RUNNING et al., 1994). São utilizados os dados dos níveis 2 e 3 com o algoritmo Ts e a emissividade recuperados dos dados do TERRA/MODIS, com resoluções espaciais de 1km e 5km da superfície terrestre em condições atmosféricas adequadas (céu limpo). O algoritmo LST é utilizado para recompor pixels com emissividades conhecidas nas bandas 31 e 32 (TRENTIN et al, 2011).

Em geral, vários estudos têm mostrado o potencial de utilização de imagens de satélites ambientais para estimativa das condições de umidade do solo. Vivoni et al. (2008) e Baup et al. (2007) avaliaram a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica, utilizando dados de sensoriamento remoto, demonstrando sua variação em regiões complexas que possuem diferenças de vegetação, de propriedades do solo e de condições hidrológicas. Pesquisas nas quais se utilizaram espectro do visível, infravermelho

termal e micro-ondas têm mostrado potencial na estimativa das condições de umidade do solo (VIVONI et al., 2008; BAUP et al., 2007; KATRA et al., 2007).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

A mesorregião do Sertão Pernambucano abrange uma área de 39.531,2 km<sup>2</sup>, é localizada ao oeste do Estado e na região do semiárido. É dividida em quatro microrregiões, Araripina, Salgueiro, Pajeú e Sertão do Moxotó e composta por 50 municípios (Figura 1).

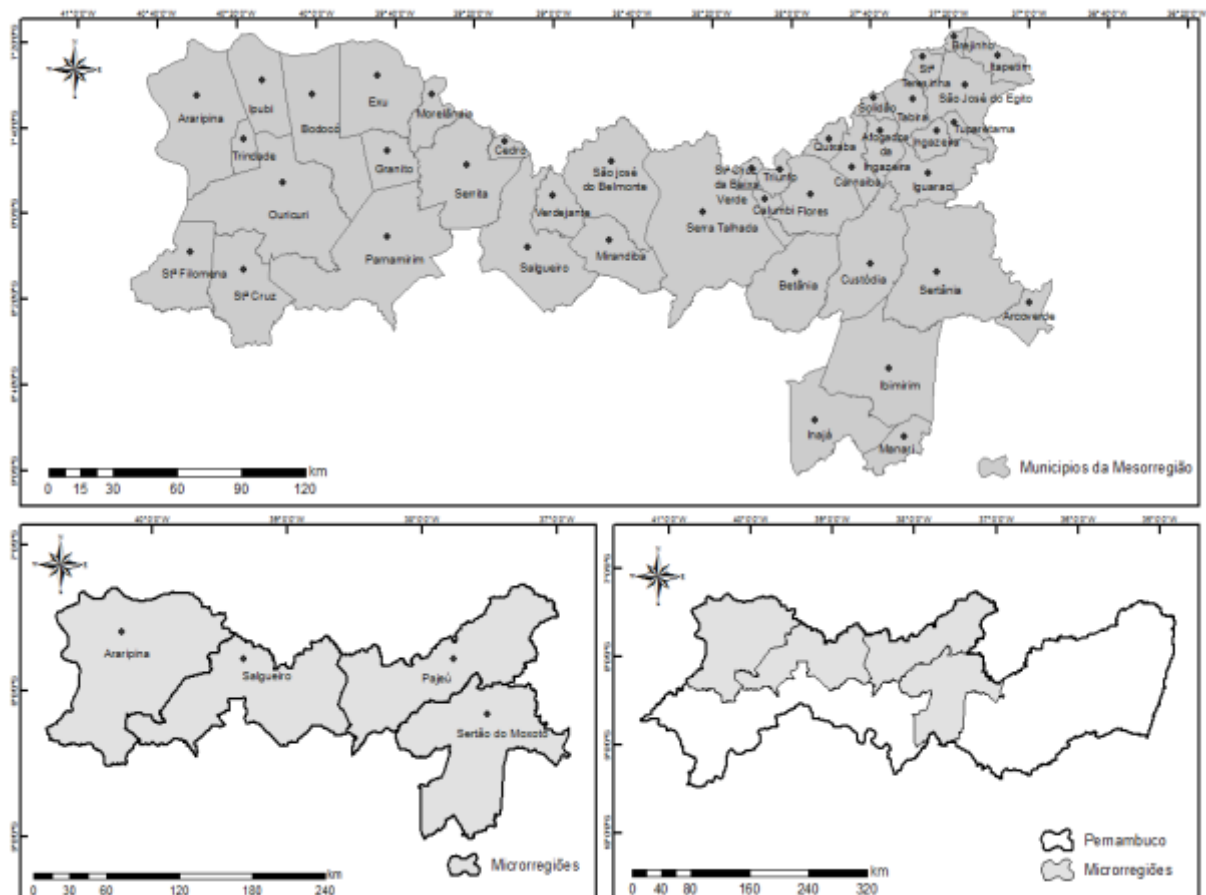


Figura 1. Municípios da mesorregião do sertão de Pernambuco.

Essa mesorregião é a menos densamente habitada de Pernambuco. Suas maiores cidades são Serra Talhada, Araripina e Arcoverde. A mesorregião é cortada por rios abundantes, como rio Pajeú, rio Brígida e o rio Moxotó, com reservatório de água ocupando uma área de 88,878 km<sup>2</sup>. Além das nascentes do rio Ipojuca que se localiza em uma serra do município de Arcoverde. Sua vegetação é composta pela Caatinga (38.697,019 km<sup>2</sup>), com árvores de médio porte, arbustos e estepe. Além disso, possui uma área de tensão ecológica de

atividade agrícola 745,303 km<sup>2</sup> (IBGE, 2004). Os solos mais comuns da mesorregião do Sertão pernambucano podem ser classificados como: Argilossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, Cambissolo Háptico Eutrófico latossólico, Latossolo Amarelo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico, Luvisso Crômico, Planossolo Nátrico (EMBRAPA, 2006; SRP, 2016).

Quanto à classificação da textura os solos da mesorregião do Sertão pernambucano (Figura 2) podem ser: arenosos, argilosos, siltosos e pedregosos.

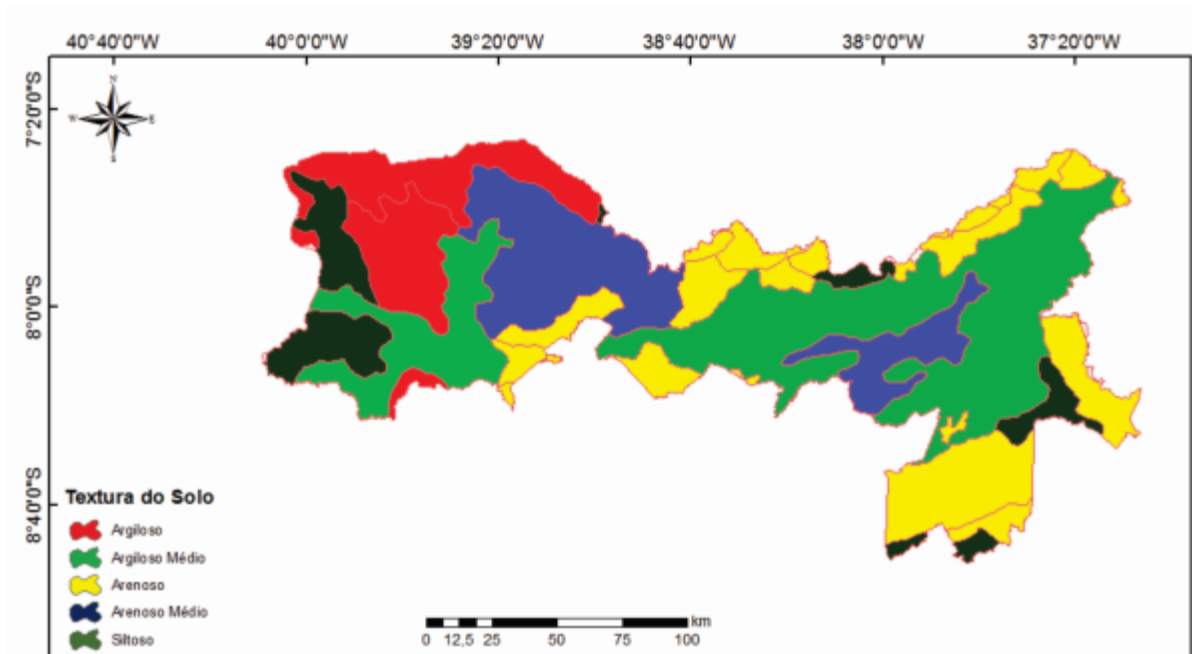


Figura 2. Textura média dos solos da mesorregião do sertão de Pernambuco.

Fonte: Adaptado de <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html>

A declividade da área de estudo varia com o relevo de plano a ondulado montanhoso ou serrano (Figura 3). Conforme Lemos e Santos (1982), os solos agricultáveis devem ter declividade do terreno de 0% a 20%. Solos acima de 20% de declividade referem-se a áreas com forte restrição agrícolas.

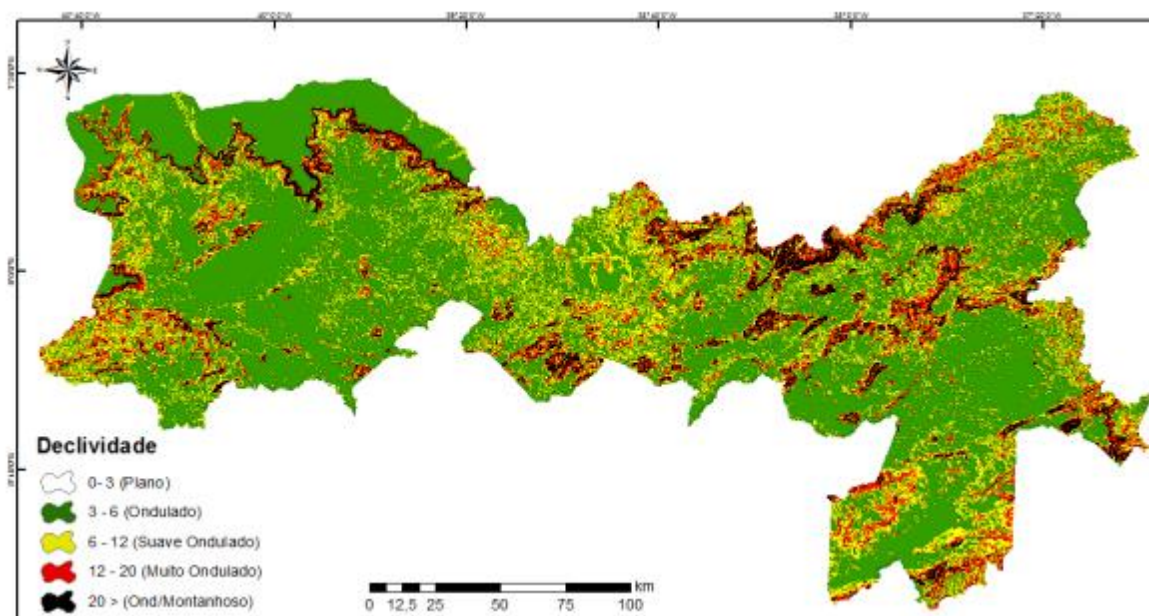


Figura 3. Declividade do terreno (%) da mesorregião do Sertão de Pernambuco.

Fonte: próprio autor.

O índice pluviométrico é baixo em relação a outras regiões do estado, as médias pluviométricas anuais variam entre 600 mm e 1.500 mm, sendo mal distribuídas ao longo do ano. Os meses mais chuvosos são correspondentes ao do verão (Dezembro, janeiro, fevereiro) com média entre 400 mm e 500 mm, e os menos chuvosos correspondentes ao da primavera, com média entre zero mm e 10 mm. As secas são muito severas e ocorre com frequência, um entrave para o desenvolvimento econômico e social da região. O clima da região é o clima semiárido, com altas temperaturas na maior parte do ano e com baixos índices de umidade relativa do ar, que variam entre 5% a 90%. As temperaturas raramente caem para menos de 10°C no inverno e raramente ultrapassam os 41°C (INMET, 2015). Tais condições climáticas refletem-se na vegetação, nos solos e no regime dos rios, assim como na produção agrícola e na mobilidade da população.

A economia da região está em torno da produção de gesso (Figura 4), que atinge a marca de 1,8 milhões de toneladas por ano, o que representa 95% de toda a produção nacional. A área, que abrange seis municípios da microrregião de Araripina, dispõe de 30% de todas as reservas brasileiras do mineral, estimadas em 700 milhões de toneladas. Um total de 312 empresas geram 12 mil postos de trabalho no Araripe, com faturamento anual de R\$ 200 milhões. Os municípios onde estão localizados os vetores do Pólo Gesseiro são: Araripina, Bodocó, Exu, Ipubí, Ouricuri e Trindade.





Figura 4. Empresa de extração do mineral para a fabricação de gesso em Ouricuri e produção de gesso em Araripina– PE. Fonte: Arquivo pessoal.

#### 4.2. Aquisição dos dados meteorológicos e climáticos

Os dados de precipitação pluviométrica e temperatura do ar (médias mensais) no período de 1911 a 1990 pertencentes a 82 postos meteorológicos da mesorregião do Sertão de Pernambuco foram obtidos na página virtual da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) ([www.dca.ufcg.edu.br](http://www.dca.ufcg.edu.br)). Estes dados foram utilizados para estimar o índice de aridez. Também, foram obtidos dados diários de temperatura mínima e máxima do ar, precipitação pluvial e umidade relativa do ar coletados por estações meteorológicas automáticas instaladas em Ouricuri ( $7^{\circ} 54' 0''\text{S}$ ,  $40^{\circ} 2' 24''\text{W}$ , 459,28 m) e Arcoverde ( $8^{\circ} 24' 36''\text{S}$ ;  $37^{\circ}4'48''\text{W}$ , 680,70 m), pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2006 e 2012.

A Figura 5 representa os períodos quinzenais da precipitação pluvial acumulada para Arcoverde nos anos de 2006 (azul) e 2012 (vermelho). Observa-se que o período de fevereiro a junho de 2006 teve uma maior incidência de chuva no município, chegando a atingir um acumulado de 83 mm na segunda quinzena de abril. Enquanto, que para 2012, apenas nos meses de julho e agosto podemos observar uma incidência considerável e um maior acumulado na segunda quinzena de janeiro. Silva (2016), em seu trabalho, obteve uma classificação (Chuvoso, normal e seco) a partir do acúmulo anual dos dados de precipitação pluvial em Arcoverde. Dessa forma, o autor classificou os anos de 2006 e 2012 como anos secos, pois tiveram acumulados de 393,2 mm e 353,2 mm, respectivamente.

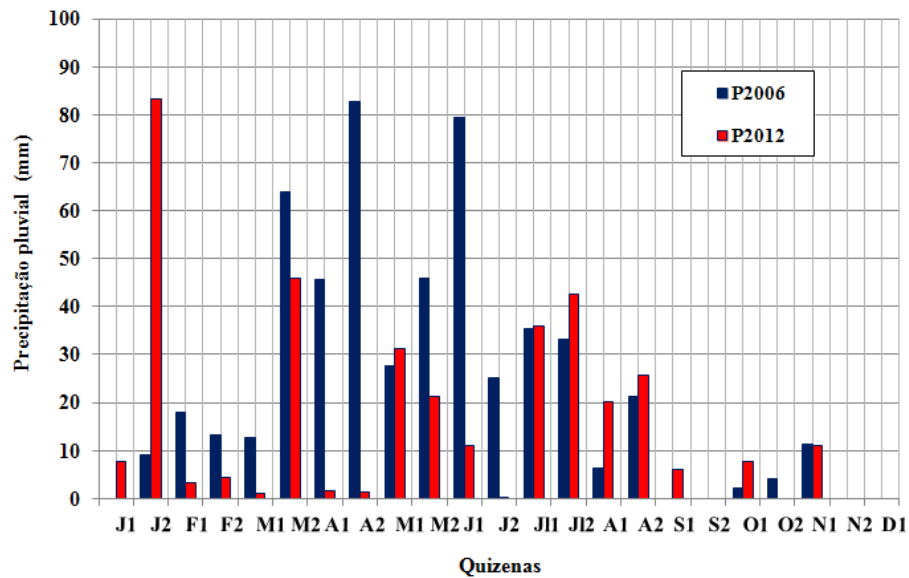


Figura 5. Precipitação pluvial acumulada de 15 dias para a estação meteorológica automática de Arcoverde para os anos de 2006 e 2012. As letras representam J1 = 1<sup>o</sup> quinzena de janeiro; J2 = 2<sup>a</sup> quinzena de janeiro e segue.

#### 4.3. Análise exploratória dos dados meteorológicos e climáticos

Os dados climáticos (temperatura do ar e precipitação pluvial) foram avaliados para determinar a necessidade de preenchimento de falhas existentes para os 82 postos meteorológicos da mesorregião do sertão pernambucano para o cálculo do índice de aridez.

Com os dados meteorológicos de Ouricuri-PE e Arcoverde-PE foram feitas as médias a cada 16 dias para relacionar com os produtos de satélite para os anos 2006 e 2012.

#### 4.4. Estimativas de índices de aridez

Os dados anuais de precipitação e temperatura do ar compreendido entre 1911 a 1990 foram utilizados para cálculos do índice de aridez ( $Ia$ ), para determinação do período de déficit e/ou excesso hídrico no verão e/ou inverno e o grau de aridez ( $Ia$ ) da região (Equações 1 e 2, respectivamente), processados conforme THORNTHWAITE & MATHER (1955) e descrito por ANDRADE JÚNIOR et al. (2005), assumindo-se a capacidade de água disponível (CAD) do solo igual a 100 mm, por meio do programa SEVAP (Sistema de Estimativa da Evapo- transpiração) descrito por SILVA et al. (2005).

$$Ia = 100 \times \frac{Def}{ETo} \quad (1)$$

$$Ia = P/ETo \quad (2)$$

em que: Def é o deficiência hídrica mensal oriunda do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) (mm); ETo é o evapotranspiração de referência ou potencial (mm); P é precipitação pluvial média mensal (mm).

A partir dos cálculos do índice e do grau de aridez foram determinados a classificação climática segundo Thornthwaite (1948) e Thorntwaite e Mather (1955) que delimitam as áreas com períodos de deficiência e excesso de água no inverno ou no verão (Tabelas 2) e o grau de aridez dessas áreas (Tabela 3).

Tabela 2. Tipos climáticos baseados no índice de aridez segundo Thornthwaite (1948) e Thorntwaite e Mather (1955).

Climas Úmidos (A, B, C2)		Índice de Aridez, Ia		
R	Deficiência d'água pequena ou nula	$0 \leq$	Ia	$< 16,7$
S	Deficiência d'água moderada no verão	$16,7 \leq$	Ia	$< 33,3$
W	Deficiência d'água moderada no inverno	$16,7 \leq$	Ia	$< 33,3$
s2	Grande deficiência d'água no verão		Ia	$\geq 33,3$
w2	Grande deficiência d'água no inverno		Ia	$\geq 33,3$

Tabela 3. Grau de aridez segundo Thornthwaite (1948) e Thorntwaite e Mather (1955).

Classes Climáticas	Índice de Aridez
Hiperárido	$< 0,05$
Árido	$0,05 < 0,20$
Semiárido	$0,21 < 0,50$
Subúmido Seco	$0,51 < 0,65$
Subúmido Úmido	$> 0,65$

Estimados os valores dos índices climáticos, foi elaborada uma planilha no Excel com contendo as variáveis: latitude, longitude e índices de aridez, fornecidas pelo BHC de cada posto. Em seguida, os índices climáticos foram interpolados pelo método do inverso da distância a uma potência no Programa Surfer para visualizar os possíveis núcleos de aridez e delimitar áreas em deficiência ou excesso hídrico no inverno ou no verão.

#### 4.5. Aquisição de imagens-produtos do sensor MODIS

As imagens do sensor MODIS utilizadas neste trabalho referem-se aos produtos MOD13 (NDVI) e MOD11 (Ts) em tons de cinzas. Esses produtos foram obtidos gratuitamente na página da internet (<http://reverb.echo.nasa.gov>) para os anos de 2006 e de 2012. Para cada ano foram utilizadas 66 imagens de NDVI e 132 imagens de temperatura da superfície. Um exemplo dos nomes dos arquivos dos produtos usados são mostrados abaixo:

Para o produto MOD13:

MOD13Q1.A2012001.h14v09.005.2012019105242.hdf

em que, MOD13Q1 = resolução espacial de 250 m e composição temporal de 16 dias; A2012001 = ano e dia Juliano; h14v9 = linha horizontal 14 e vertical 9; 005 = versão do produto; 201297203243 = ano, intervalo de processamento; hdf = formato.

Para o produto MOD11:

MOD11A2.A2012001.h14v09.005.2012097203243.hdf

em que, MOD11A2 = resolução espacial de 1km e composição temporal de 8 dias.

#### 4.6. Pré-processamento das imagens-produtos MODIS na ferramenta MRTOOL

Após adquirir as imagens de NDVI e Ts dos produtos MOD13 e MOD11, elas foram utilizadas na ferramenta MRTool (WEISS, 2006). Essa ferramenta é específica para importar imagens-produtos com a extensão HDF (Hierarchical Data Format). Neste aplicativo é possível selecionar os produtos NDVI e Ts, fazer o recorte da área de estudo, informar as coordenadas geográficas, mudar a extensão de HDF para TIFF (Tagged Image File Format), informar a projeção geográfica e o elipsóide World Geodetic System 1984 (WGS84).

Este pré-processamento no MRTOOL das imagens de NDVI e Ts é necessário para que sejam importadas para o programa computacional SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas). As imagens de Ts foram redimensionadas para as resoluções espaciais de 250 m e composição temporal de 16 dias.

Os produtos MOD13 e MOD11 são adquiridos em níveis de cinza (NC) e foram convertidos para NDVI e Ts (°C) em programação no SPRING dado pelas Equações 3 e 4:

$$NDVI = 0,0001 \times NC_{NDVI} \quad (3)$$

$$Ts = 0,02 \times NC_{Ts} - 273 \quad (4)$$

As imagens de NDVI foram classificadas e estimada a porcentagem da área de cada classe em relação a área total para os anos de 2006 e 2012, conforme sugerido por Santos e Aquino (2015), Tabela 4. No programa SPRING foi feita uma classificação por fatiamento das imagens de NDVI para 2006 e 2012.

Tabela 4 - Classificação dos intervalos do NDVI para 2006 e 2012

Classes de NDVI	Intervalos do NDVI
Alta	0,8 a 1,0
Moderadamente Alta	0,6 a 0,8
Moderada	0,4 a 0,6
Moderadamente Baixa	0,2 a 0,4
Baixa	0,1 a 0,2
Solo exposto	0,0 a 0,1
Água	< 0,0

Fonte: Adaptado de SANTOS & AQUINO (2015)

Em trabalhos realizados por Ponzoni et al. (2012), sugere-se que se faça a determinação da fração de solo coberta pela vegetação (FC) e o índice de área foliar (IAF) para minimizar erros causados por sombreamento em região de cobertura densa em relação a áreas espessas. Desta forma, os valores de IAF são estimados a partir das imagens de NDVI que são, primeiramente, transformadas em imagens de FC, através do método proposto por Choudhury et al. (1994), de acordo com Equação 5:

$$F_c = 1 - \left( \frac{NDVI_{\max} - NDVI}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^{0,9} \quad (5)$$

em que  $NDVI_{\max}$  = valor máximo do NDVI da imagem;  $NDVI_{\min}$  = valor mínimo do NDVI da imagem;  $NDVI$  = valor do NDVI do pixel a ser considerado. Segundo Norman et al. (2003), o IAF é estimado pela Equação (6):

$$IAF = -2 \times \ln(1 - FC) \quad (6)$$

Uma vez estimado o IAF para cada célula de 250 m x 250 m (pixel), este é utilizado no modelo para o cálculo do fator de compensação de crescimento ( $F_{cc}$ ) proposto por Doorenbos e Kassam (1979) expresso pela Equação 7:

$$Fcc = 0,515 - e^{-0,664 \cdot (0,515 \cdot IAF)} \quad (7)$$

#### 4.7. Índice de umidade derivado da temperatura da superfície

O produto MOD11 foi multiplicado pelo fator de correção 0,02 e subtraído de 273 para obtenção de imagens de  $T_s$  em graus Celsius. A partir da determinação da  $T_s$  aplicou-se a equação do índice de umidade do solo (IUS) para  $T_s$ . O índice IUS para  $T_s$  tem valores de 0 para superfícies mais secas, e 1 para superfícies mais úmidas (Zhan et al., 2004). O IUS foi calculado diretamente da temperatura da superfície pela Equação 8:

$$IUS_{T_s} = \frac{T_{s_{\max}} - T_s}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (8)$$

em que:  $T_{s_{\max}}$  e  $T_{s_{\min}}$  são os valores máximo e mínimo da temperatura da superfície para a região de estudo.  $T_s$  é função do valor de cada pixel.

#### 4.8. Índice de umidade do solo derivado do NDVI

O IUS também foi derivado do índice de vegetação (NDVI). A equação do IUS derivado do NDVI foi estimada por meio da Equação 9:

$$IUS_{NDVI} = 1 - \frac{NDVI_{\max} - NDVI}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (9)$$

A constante 1 refere-se à inversão dos valores pois, quanto maior o valor do NDVI maior também o índice de umidade da superfície (Wang et al., 2010). O  $NDVI_{\max}$  e o  $NDVI_{\min}$  se referem aos valores de máximo e mínimo da imagem de NDVI que ocorram na região de estudo. O NDVI é função do valor de cada pixel.

#### 4.9. Índice de umidade da superfície do solo

O IUS (Índice de Umidade da superfície do Solo) foi calculado utilizado à Equação 10:

$$IUS = \frac{IUS_{Ts} - IUS_{NDVI}}{2} \quad (10)$$

#### 4.10. Análise de regressão múltipla

O modelo de regressão múltipla foi utilizado para relacionar os valores estimados de IUS (Equação 10) com as variáveis meteorológicas medidas nas estações meteorológicas automáticas de Ouricuri e Arcoverde-PE, condicionadas a significância do modelo (coeficiente de determinação e correlação) de probabilidade menor que 5% e o erro padrão de estimativa baixo. Os valores de IUS estimados por um modelo de regressão linear múltipla baseado somente em dados meteorológicos é dado pela Equação 11:

$$Y_i' = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + X_3 \cdot \beta_3 + X_4 \cdot \beta_4 + X_5 \cdot \beta_5 + X_6 \cdot \beta_6 + X_7 \cdot \beta_7 + X_8 \cdot \beta_8 + \varepsilon \quad (11)$$

em que:  $Y_i'$  é o índice de umidade da superfície do solo estimado (dependente),  $X_1$  é a precipitação pluvial (mm),  $X_2$  é a temperatura máxima (°C),  $X_3$  é a temperatura mínima (°C),  $X_4$  é a insolação (h),  $X_5$  é a evaporação (mm),  $X_6$  é a temperatura média diária (°C),  $X_7$  é a umidade relativa (%),  $X_8$  é a velocidade do vento (m/s),  $\varepsilon$  é erro padrão,  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ ,  $\beta_5$ ,  $\beta_6$ ,  $\beta_7$ ,  $\beta_8$  são os parâmetros a serem estimados.

#### 4.11. Análise estatística

Para verificar o grau de ajustamento, foram calculados os respectivos coeficientes de determinação e o grau da correlação foi verificado através da Tabela 5, proposta por Devore (2006), que indica o grau de ajuste pelos coeficientes de correlação de Pearson (r). Foi utilizado o programa Statistica.

Tabela 5. Coeficiente de correlação de Pearson.

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

Fonte: Adaptado de Devore (2006)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Índice de Aridez

A Figura 6 mostra a espacialização do índice de aridez ( $I_a$ ) climatológico para delimitação das áreas suscetíveis à desertificação na mesorregião do Sertão de Pernambuco. Observa-se que não existem áreas hiperáridas ( $I_a < 0,05$ ) ou áridas ( $0,05 < 0,20$ ). No entanto, percebe-se que existem formações de possíveis núcleos de aridez (coloração amarelada a alaranjada) com valores de  $I_a$  no limite inferior das regiões semiáridas ( $0,21 < I_a < 0,50$ ). Estes núcleos estão localizados nos municípios de Arcoverde, Sertânia, Igaraci, Afogados da Ingazeira, Ingazeira, Carnaíba e Tabira.

De acordo com o PAN-Brasil (BRASIL, 2004), as áreas suscetíveis à desertificação apresentam fragilidades naturais, especialmente a climática. Nestas regiões as alterações climáticas aliadas às práticas humanas de modo desordenado podem acelerar o processo de degradação das terras (SANTOS & AQUINI, 2015). Para Matallo Junior (2003) o clima semiárido, a desertificação e o índice de aridez tem uma forte ligação entre eles, de forma que o índice de aridez é utilizado como indicador da condição de desertificação de um local, pois quanto menor for, maior será a susceptibilidade da área para ocorrência da desertificação. O cenário geográfico onde está inserida, inteiramente, a mesorregião do Sertão pernambucano é o semiárido, com condições climáticas desfavoráveis às atividades relacionadas à produção agrícola.



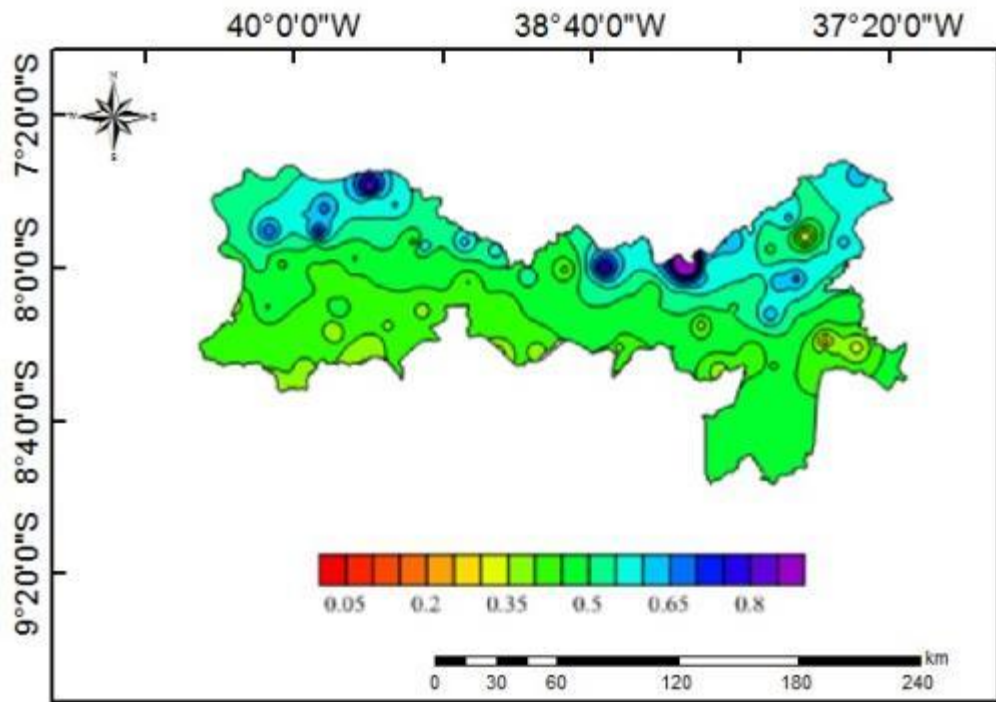


Figura 6. Espacialização do índice de aridez climatológica para delimitação das áreas suscetíveis à desertificação (1911 – 1990) para a mesorregião do Sertão Pernambucano.

Na Figura 7, as regiões com coloração variando de laranja a vermelha se destacam por ocorrer uma grande deficiência de água no inverno (Junho, Julho, Agosto), com valores de 60 a 70 de grau de aridez, localizados os municípios de Ouricuri, Arcoverde, Parnamirin, Sertânia, São José do Egito, Betânia, Serra Talhada, Mirandiba, Salgueiro, Serrita e Santa Cruz. Esses valores apresentados estão relacionados ao clima semiárido da região, que é quente e seco, com temperaturas elevadas e tem regime pluvial irregular, com chuvas escassas e mal distribuídas durante o ano.

O município de Ouricuri - PE apresenta uma forte irregularidade no regime de chuvas, que associada às ações de degradação do bioma Caatinga, tais como: retirada da vegetação, superpastoreio, produção de gesso e construção de cercas, vem potencializando a intensificação dos processos erosivos na região. A pecuária extensiva vem contribuindo para a aceleração dos processos de desertificação no Município. O pisoteio gerado pelo sobrepastoreio e a degradação da vegetação arbustiva da Caatinga, vem retirando a proteção natural dos solos frente aos processos erosivos (TRICART, 1977). Além disso, Sampaio et al. (2003) afirmam que a salinização do solo em função do cultivo continuado de culturas agrícolas como cebola e alho irrigados e sem condições adequadas de drenagem tem contribuído para formação de núcleo de desertificação no município de Cabrobó. Sá &

Angelotti (2009) apontam, ainda, o desmatamento como uma das principais causas da degradação em Cabrobó. As atividades pecuárias e gesseiras, muito fortes na região, têm historicamente se mostradas muito impactantes, gerando zonas abertas e de solos expostos favoráveis ao processo de desertificação.

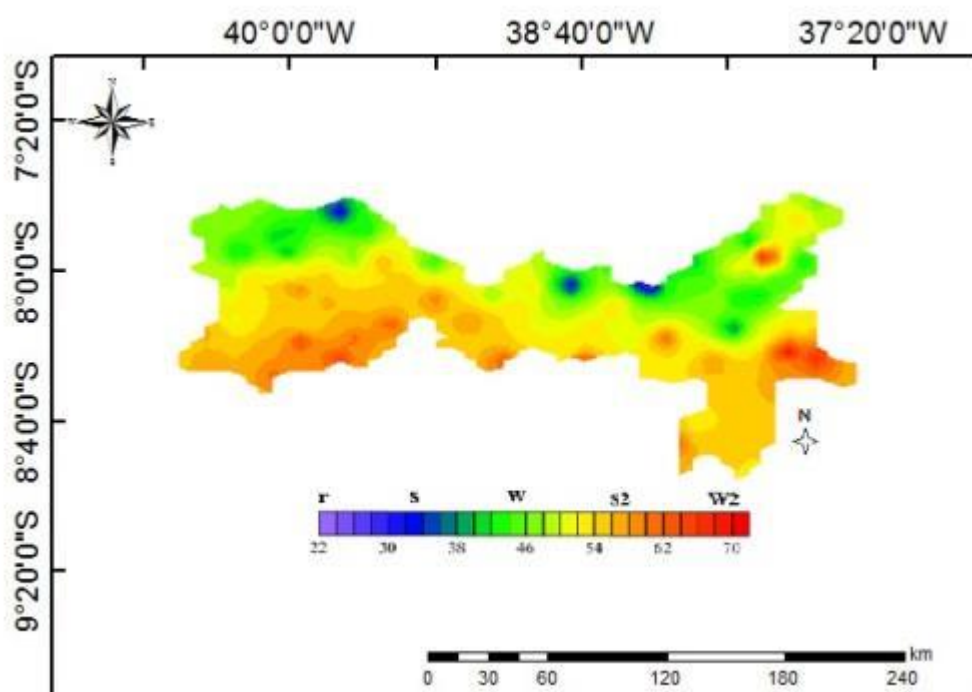


Figura 7. Carta temática do índice de aridez climatológica de acordo com a deficiência e excesso hídricos nos meses de verão e inverno de 1911 a 1990 para a mesorregião do Sertão Pernambucano.

## 5.2. Índice de Vegetação

A Tabela 6 possibilita inferir que as classes de proteção das terras na mesorregião do Sertão pernambucano apresentaram grandes mudanças, pois a classe de solo exposto teve redução de 45,3%, a água de 68,2%, a classe Baixa de 7,4% de 2006 para 2012; por sua vez, a classe Moderadamente Baixa teve o mais significativo aumento de 139,6%, de 2006 para 2012; por outro lado, as classes de proteção que apontaram maiores perdas foram a Moderada que foi reduzida em 49,9% e a classe Moderadamente Alta foi reduzida em 92,7%; a classe de maior proteção, ou seja, a Alta apresentou foi suprimida.

Dados apresentados por Santos & Aquino (2015), no município de Castelo do Piauí, mostraram que a perda da classe de maior proteção da cobertura vegetal é devido as atividades humanas tais como a expansão dos cultivos agrícolas, aumento dos efetivos

bovinos e ovinos, aumento da extração vegetal para a produção de carvão vegetal e produção de lenha. Para Barbosa et al., (2014), essa variação na cobertura vegetal pode está associada ao período chuvoso dessa Mesorregião que vai de dezembro a maio e o período seco de junho a novembro. Braga et al. (2003) fizeram uso de dados do NDVI do sensor AVHRR / NOAA e precipitação pluvial para determinar o tempo de resposta da vegetação às precipitações em regiões homogêneas na região Nordeste do Brasil. Os resultados mostraram que na Caatinga os maiores valores do NDVI ocorrem com defasagem temporal de um mês, após a maior precipitação pluvial, enquanto que, para os demais tipos de cobertura, a defasagem é de dois meses.

Tabela 6 - Distribuição absoluta e relativa dos valores de NDVI na mesorregião do Sertão pernambucano, comparação para anos de 2006 e 2012.

Classes de proteção da cobertura vegetal (NDVI)	Área no nível (km <sup>2</sup> )		% da área total	
	2006	2012	2006	2012
Alta	1,5	-	0,004	-
Moderadamente alta	6.672,3	487,3	16,845	1,230
Moderada	31.314,3	15.688,0	79,059	39,607
Moderadamente baixa	1.564,2	23.392,3	3,949	59,058
Baixa	29,7	27,5	0,075	0,069
Solo exposto	22,5	12,3	0,057	0,031
Água	4,4	1,4	0,011	0,003
Total	39.608,8	39.608,8	100	100

É considerado para os valores de NDVI, que quanto mais próximo de 1, mais a área terá uma vegetação densa, dessa forma quando o valor chega próximo de 0 (zero) representa uma superfície não vegetada (ROSENDO, 2005).

Na Figura 8 tem-se a média anual do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para anos de 2006 e 2012, em que observar-se a diferença da quantidade de vegetação existente na área estudada. O ano de 2006 destaca-se por apresentar áreas com vegetação, prevalecendo os valores de NDVI de 0,4 a 0,6 (Moderada) na área verde-clara e entre 0,6 a 0,8 (Moderadamente alta) na área verde-escuro. Para o ano de 2012 observamos que se destaca por ter NDVI de 0,2 a 0,4 (Moderadamente baixa) na área amarela, tendo poucas áreas com o NDVI entre 0,4 a 0,6 (Moderada) na área verde-claro. Isso indica que no ano de 2006 obteve-se uma média de mais áreas com presença de vegetação, ao contrário de 2012, que apresentou áreas com pouca vegetação ou vegetação seca. Esses dados podem está aliados a pouca precipitação pluvial obtido em 2012, ligada às temperaturas altas e ao desmatamento ocorrentes na área. Sampaio (2003) apud Ferreira (2011) diz que o fator de

maior influência no comportamento da vegetação, principalmente em regiões semiáridas, é representado pela precipitação, uma vez que esta exerce importante papel na distribuição das espécies, produção de biomassa, configuração do relevo e condições edáficas.

Silva (2009), em sua pesquisa sobre a evapotranspiração na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe, verificou que o valor do NDVI aproxima-se de zero quando áreas apresentam solo exposto ou áreas cobertas por vegetações caducifólias ralas que não se mantêm verde na estação seca. Merece destacar que no ano de 2012 o Nordeste teve a pior seca dos últimos 30 anos. Os principais efeitos da seca sobre a Caatinga foram marcados com aumentos de risco de erosão, de magnitude dos incêndios florestais e da diminuição do fluxo de rios e lagos (CEPED, 2016).

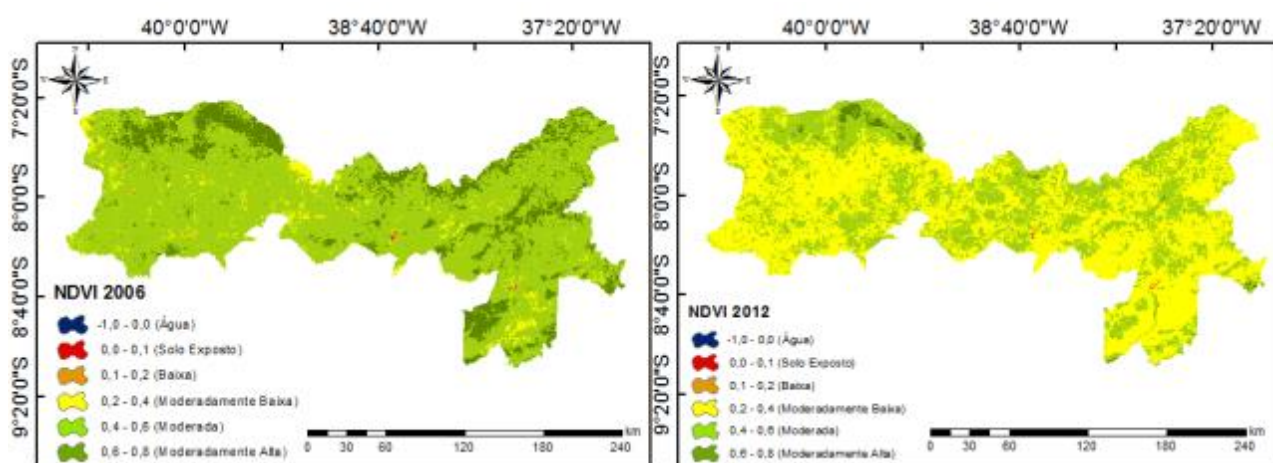


Figura 8 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da mesorregião do sertão pernambucano, comparação para anos de 2006 e 2012.

A comparação dos valores quinzenais obtidos nas imagens de NDVI de 2006 e 2012 (Figura 9) para um pixel localizado na estação meteorológica automática do município de Arcoverde-PE, nota-se que apenas no mês de fevereiro e na primeira quinzena de março 2006 o NDVI foi baixo em relação a 2012, sobressaindo no restante dos meses. Em 2006 o menor valor foi 0,4 para dezembro e o maior foi 0,8, tendo maiores índices entre abril e agosto. Para 2012, que teve baixos índices de NDVI, foi de 0,2 em novembro e o maior de 0,7 em julho, apresentando entre os meses de julho e agosto os maiores valores de NDVI. Estes resultados estão de acordo com Lisita et al (2013), analisando imagens de NDVI do Sertão Pernambucano, concluíram que entre abril e maio de 2007 (final da estação chuvosa), a área de vegetação da Caatinga do Sertão apresentou valores superiores a 0,8 de NDVI, em oposição aos baixos índices observados na estação seca: em outubro de 2007, chegou a 0,27, indicando que o NDVI da Caatinga atinge valores mínimos no final da estação seca.

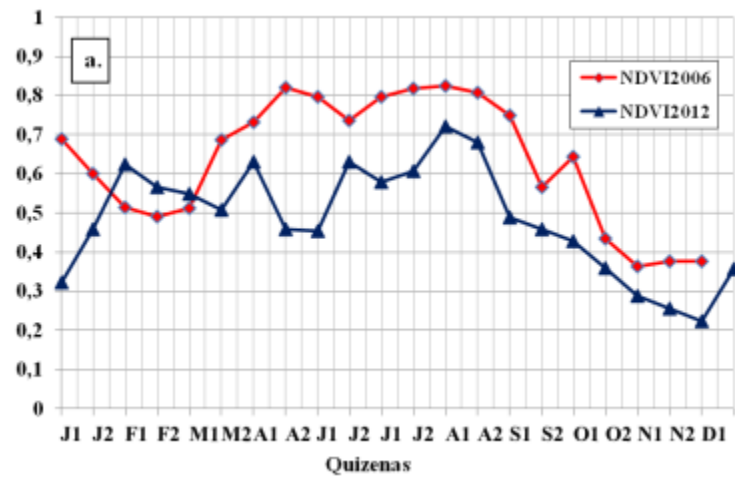


Figura 9. Ciclo qinzenal do NDVI para a localização da estação meteorológica automática de Arcoverde – PE para 2006 e 2012.

A Figura 10 mostra as distribuições espaciais e temporais de FC para 2006 e 2012. Como os valores de FC são dependentes do NDVI os resultados são semelhantes, com uma alta de FC para o ano de 2006 e baixa de FC para 2012, com áreas apresentando uma porcentagem de 40% a 60% (Média – coloração amarela) e de 60% a 80% (Alta – coloração laranja) e porcentagens de 20% a 40% (Baixo – coloração verde) e de 40% a 60% (Média – coloração amarela), respectivamente. Isso mostra que a mesorregião do Sertão de Pernambuco teve uma grande mudança na vegetação comparando FC de 2006 a Fc de 2012.

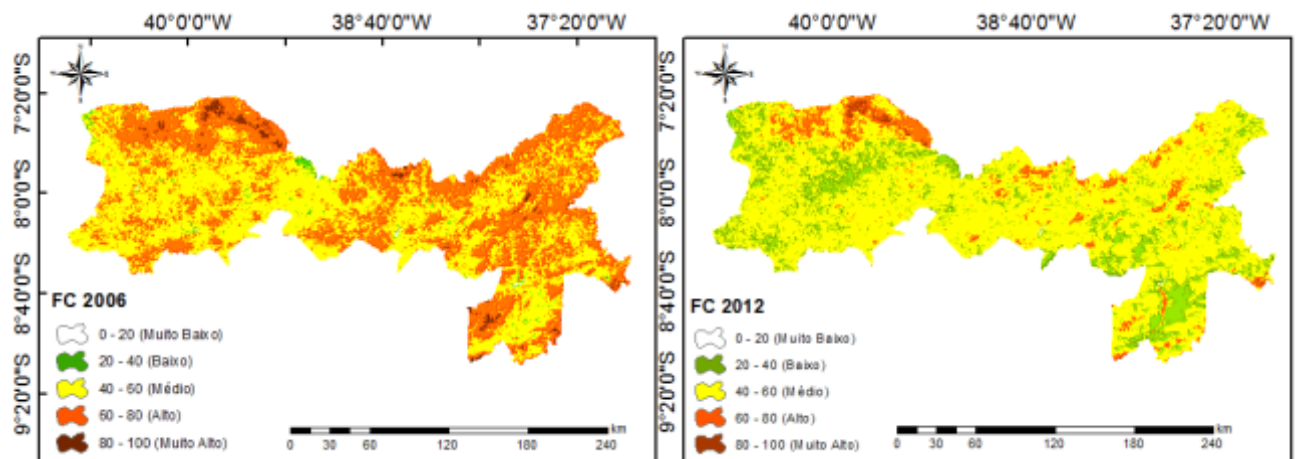


Figura 10 - Carta temática da fração de solo coberto por vegetação (FC) da mesorregião do sertão pernambucano para 2006 e 2012.

O índice de área foliar (IAF) observado na Figura 11 apresentou áreas com valores de  $1,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a  $2,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  (Médio) e de  $2,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a  $3,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  (Alto) para o ano de 2006. Na carta temática de 2012 o IAF apresentou valores de  $1,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a  $2,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  (Médio) e de  $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$  a  $1,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  (Baixo), indicando, dessa forma, que ocorreram perdas de área foliar na região estudada. Não foi observado uma relação direta entre NDVI e IAF. Isto concorda com Ha et al. (2001) que analisaram a variabilidade do NDVI, do IAF e temperatura da superfície estimada a partir de dados do sensor AVHRR/NOAA na Coréia. Os autores observaram que a variabilidade interanual do IAF depende do tipo de vegetação e que as mudanças do IAF não estão relacionadas com as variações do NDVI. Para Wang et al.(2005), a relação entre NDVI e IAF pode variar sazonalmente e interanuais com as variações de desenvolvimento fenológico da vegetação e em resposta a variações temporais das condições ambientais. Além disso, esses autores afirmam que a relação estabelecida entre o IAF e NDVI num determinado ano pode não ser aplicável em outros anos, por isso é necessário prestar atenção à escala temporal ao aplicar relações entre NDVI e IAF.

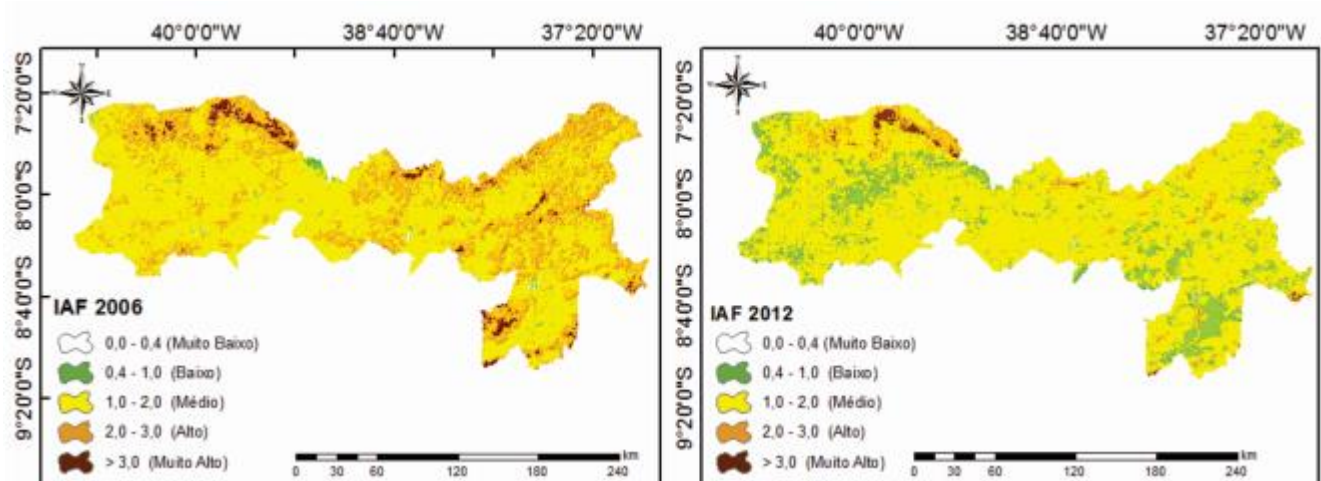


Figura 11 – Cartas temáticas do índice de área foliar (IAF) da mesorregião do Sertão pernambucano para 2006 e 2012.

A Figura 12 mostra o fator de crescimento da cobertura vegetal (Fcc) para os anos de 2006 e 2012. Observa-se que os anos de 2006 e 2012 apresentam fatores de 97% e 87%, respectivamente, na classe baixa de crescimento da cobertura vegetal. Esse resultado indica que há um baixo crescimento da vegetação (Caatinga) nas áreas da mesorregião do Sertão de Pernambuco, visto que na maior parte do ano a vegetação é rala e seca. Além da grande falta de chuva na região que interfere diretamente no crescimento da vegetação.

A eliminação sistemática da cobertura vegetal e o uso indevido da terra têm acarretado graves problemas ambientais ao semiárido nordestino, entre os quais se destacam: a redução da biodiversidade, a degradação dos solos, o comprometimento dos sistemas produtivos e a desertificação de extensas áreas na maioria dos estados que compõem a região (PEREIRA et al., 2001).

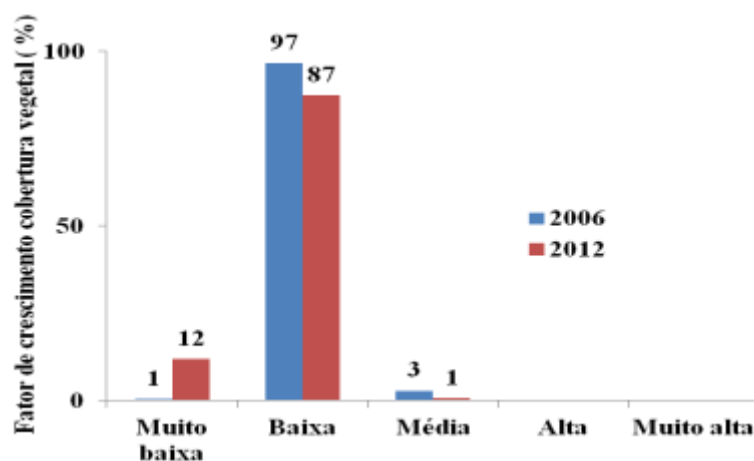


Figura 12. Fator de crescimento da cobertura vegetal (%) para a mesorregião do Sertão pernambucano para os anos de 2006 e 2012.

### 5.3. Temperatura da superfície

Observa-se na Figura 13 o aumento da temperatura da superfície em toda região de 2006 para o ano de 2012. Alguns municípios da região do Sertão de moxotó chegaram a registrar temperatura média variando de 31°C a 37°C em 2006 (área marron) e de 37°C a 43°C em 2012 (área vermelha). Na região do Araripe os Municípios passaram de 13°C a 19°C em 2006 (área verde) para 31°C a 37°C em 2012 (área marron). Na região de Salgueiro as temperaturas passaram de 13°C a 19°C em 2006 (área verde) para 19°C a 25°C em 2012 (área bege).

Isso se deu pelo período de estiagem e seca severa que toda a região do nordeste sofreu no ano de 2012, onde muitos municípios entraram em estado de emergência pela falta de água e altas temperaturas, assim prejudicando todas as atividades agropecuárias, consequentemente atingindo a economia de toda população dessas áreas. “O Nordeste tem a pior seca dos últimos 30 anos (alguns meios de comunicação afirma que dos últimos 60 anos),

desimano quase por completo a Pecuária e Agricultura familiar. A terra sem verde, os rios sem água e os animais magros ou mortos pelos pastos do sertão. Em algumas regiões do semiárido nordestino não caiu nenhuma gota d'água em 2012. Essa seca terminou com grande prejuízo para os criadores do Nordeste” (CEPED/UFSC, 2015). Segundo os dados da pesquisa Produção da Pecuária Municipal, do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas), a região perdeu 4 milhões de animais. Em relatório os cientistas da Agência espacial americana, Nasa, mostraram que a temperatura no planeta continua em elevação e que 2012 foi o nono ano mais quente desde que começaram as medições em 1880.

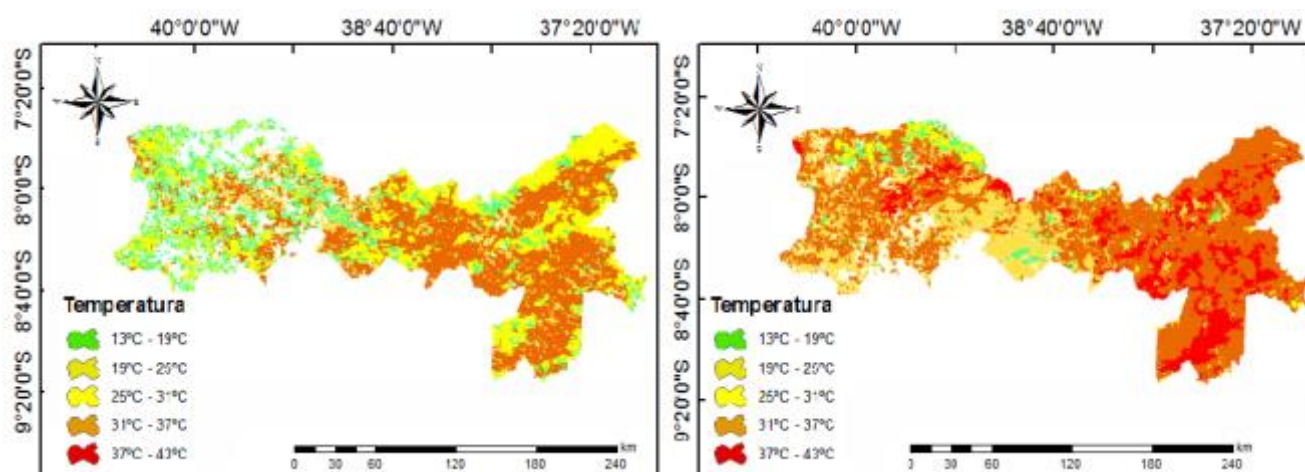


Figura 13. Carta temática média da Temperatura da superfície do solo ( $^{\circ}\text{C}$ ) da mesoregião do Sertão de Pernambuco para os anos de 2006 e 2012.

A relação linear entre os valores de Temperatura da superfície do solo ( $T_s$ ) e de NDVI obtidos para o pixel central que contem a estação meteorológica automática de Arcoverde-PE é mostrada na Figura 14. Obteve-se um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,62 (coeficiente de correção de 0,79), ou seja, as variações no NDVI explicam 62% da variabilidade dos valores de  $T_s$ . Observa-se, ainda, que os valores de NDVI baixos (aproximadamente 0,3) associados a pouca vegetação estão relacionados com valores elevados de  $T_s$  ( $42^{\circ}\text{C}$ ), enquanto que valores elevados de NDVI (aproximadamente 0,7) associadas à vegetação densa apresentam menores valores de  $T_s$  ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ). Em estudo feito na cidade de Campinas – SP, Saraiva et al. (2012) obtiveram uma correlação de 0,69 para a relação entre temperatura da superfície e NDVI, isso pode ser explicado por áreas rurais ou urbanas com alto índice de cobertura vegetal em geral apresentam temperaturas mais amenas. Almeida et al. (2015) analisaram a relação entre a temperatura da superfície e o NDVI para a cidade de Maceió – AL, obtendo a existência de uma fraca correlação entre as variáveis, no valor de 0,28, destacando que não foi o resultado esperado.



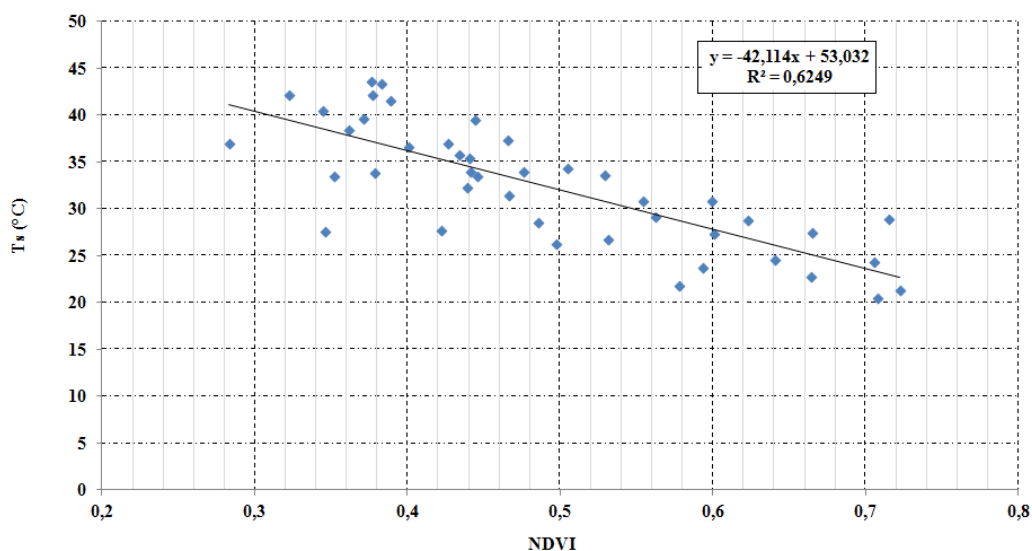


Figura 14. Relação linear entre temperatura da superfície ( $T_s$ , °C) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para a estação automática de Arcoverde-PE para os anos de 2006 e 2012.

#### 5.4. Índice de Umidade da superfície do solo

Na Figura 15 têm-se as cartas temáticas do índice de umidade do solo (IUS) baseado na  $T_s$  e NDVI para os anos de 2006 e 2012 da área estudada. Percebe-se que o ano 2006 teve mais regiões com índices entre 0,58 a 0,81, indicando que essas áreas tem um grau de umidade do solo significativo, característica de áreas com vegetação. Para o ano de 2012 foram obtidos mais áreas com valores entre 0,28 a 0,34, o que significa que para esse ano aumentou a presença de áreas secas e com pouca vegetação ou quase nenhuma vegetação (solo exposto), característica de áreas degradadas. Lopes et al (2011), em seu trabalho no Seridó-PB, comentam que este valores revelam a influência da vegetação nas condições de umidade do solo e no diagnóstico de áreas desertificadas. Resultados semelhantes foram obtiveram Wang et al. (2010) ao utilizarem o NDVI e  $T_s$  para estimar a umidade do solo.

Zeng et al (2004), em seu trabalho, obtiveram valores de IUS que revela áreas de desertificação, indicando que o variação do IUS esteve positivamente relacionada com a gravidade de desertificação. Estes autores encontraram valores de IUS médio de 0,34, em terras pouco degradadas, 0,31 em terras desertificadas moderadas, 0,28 em terras degradadas grave, e 0,26 em área em estado de desertificação muito severo. Esse resultado pode interferir potencialmente nas degradação da região e no meio ambiente.

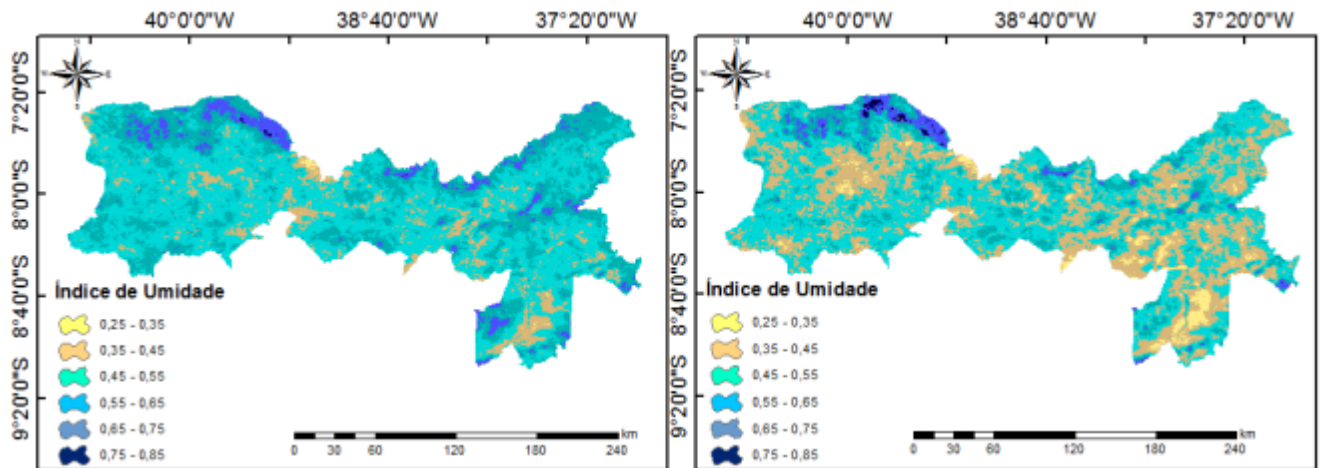


Figura 15. Carta temática do índice de umidade do solo da mesoregião do sertão de Pernambuco para 2006 e 2012.

Nas Figuras 16a e 16b mostram as relações lineares entre  $T_s$  x IUS e NDVI x IUS para o pixel central da estação automática de Arcoverde-PE para os anos de 2006 e 2012. Observou-se que os coeficientes de determinação e correlação foram satisfatórios entre as variáveis IUS x NDVI ( $R^2 = 0,60$ ;  $r = 0,77$ ) e IUS x  $T_s$  ( $R^2 = 0,62$ ;  $r = 0,79$ ). Lopes et al. (2011), analisando a região do Seridó-PB, obtiveram uma boa correlação do índice de umidade com os parâmetros NDVI e  $T_s$  apresentando correlações de 0,90 e 0,87, respectivamente. Além disso, percebe-se nas Figuras 16a e 16b que valores de IUS altos (0,7 aproximadamente) correspondem a valores de NDVI também são elevados (0,8 aproximadamente) e  $T_s$  amenas ( $20^\circ\text{C}$ ). Por outro lado, para valores baixos de IUS (0,4 aproximadamente) corresponderam a valores baixos de NDVI (0,2 aproximadamente) e  $T_s$  elevada ( $40^\circ\text{C}$  aproximadamente). Esta relação mostra uma medida significativa da intensidade de relação entre os parâmetros.

Friedl e Davis (1994) sugerem que em situações de elevada umidade, a temperatura superficial e o NDVI são bons indicadores de umidade, pois são sensíveis ao aumento da inércia térmica do solo. Segundo Silva et al. (2007) apesar do NDVI não ser diretamente ligado a obtenção da umidade do solo, muitos estudos mostram que ele pode ser utilizado para monitorá-la, pois durante períodos de baixa precipitação a vegetação sofre diretamente os impactos da queda da umidade no solo. Maffra (2004) conclui que em solos expostos à radiação, a capacidade de aquecimento, que depende do tipo de solo, irá refletir na temperatura superficial em função da evapotranspiração e conseqüentemente da umidade. Assim, existe uma alta correlação entre a umidade e a temperatura superficial, o que justifica o uso das imagens de temperatura superficial na detecção da umidade do solo.

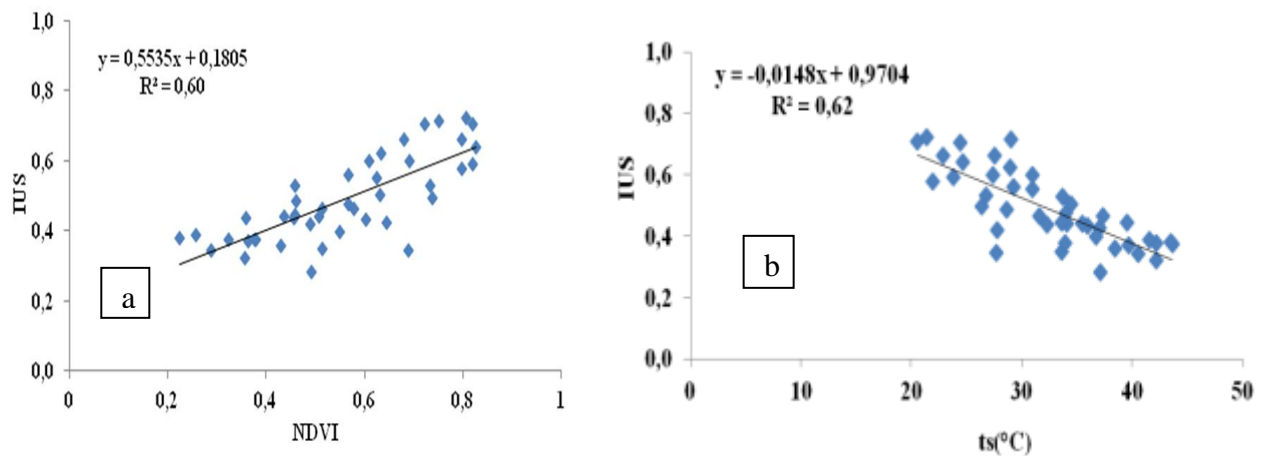


Figura 16. Relação linear entre índice de umidade do solo e NDVI (a) e Ts (b) para a localização da estação meteorológica automática de Arcoverde – PE para 2006 e 2012.

As Figuras 17a e 17b mostram a variabilidade temporal do índice de umidade do solo e o NDVI para os anos de 2006 e 2012 para Arcoverde-PE. Observa-se que os valores de índice de umidade do solo variam de acordo com o NDVI, ou seja, quando o NDVI apresentar valor baixo o IUS também apresentará, da mesma forma quando o NDVI for alto ocorrerá o aumento do IUS. Nos meses de março a setembro de 2006 ocorreram os maiores índices de vegetação tendo uma média de 0,8, aproximadamente e uma média de índice de umidade de 0,7, aproximadamente. Valores baixos de NDVI e IUS foram obtidos de outubro a dezembro de 2006, com média de 0,3 aproximadamente. Para 2012 os meses de julho e agosto tiveram valores de NDVI e IUS variando entre 0,6 e 0,7 e os meses de setembro a outubro apresentaram valores de 0,2 a 0,4.

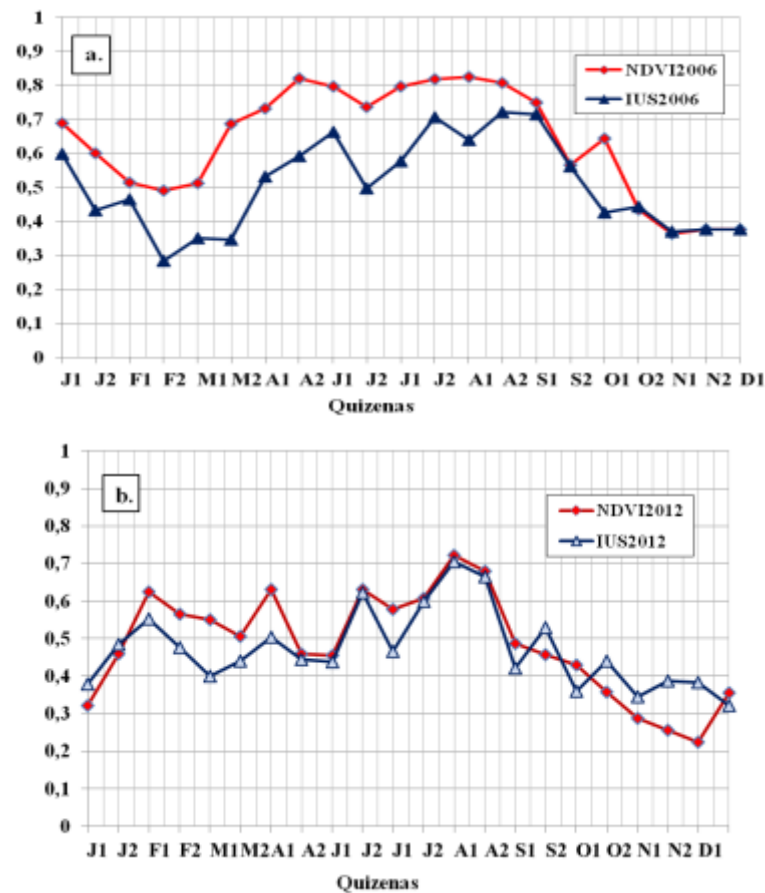


Figura 17. Variabilidade temporal do índice de umidade do solo (IUS) e o NDVI (a) para os locais das estações meteorológicas automáticas de Arcoverde (a e b) para 2006 e 2012.

### 5.5. Análise de regressão linear múltipla

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os modelos de regressões lineares múltiplas para a estimativa da umidade do solo nos municípios de Ouricuri - PE e Arcoverde - PE. Os modelos apresentaram-se significativo no nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ) com intervalo de confiança de 95% para os valores estimados, apresentando bom coeficiente de determinação ( $R^2$ ), em torno de 74% para Ouricuri e de 68% para Arcoverde-PE. Observa-se que para Ouricuri e Arcoverde, apesar de apresentarem valores negativos a variável temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) teve uma correlação bem fraca em relação ao IUS e a evaporação (mm) apresentou uma correlação forte. Nesse caso, para variáveis negativas, à medida que o IUS cresce as variáveis (temperatura mínima e a evaporação) decrescem. Isto está de acordo com Koster & Suarez (2001) que desenvolveram um modelo estatístico e demonstraram que a variabilidade da umidade do solo não só é controlada pelas condições atmosféricas (precipitação e radiação), mas também por processos terrestres superficiais (evaporação e escoamento) e o retorno da umidade do solo para consequentes condições atmosféricas. Lei et

al. (2011) reforçam que a variação espaço-temporal da umidade do solo é causada por um efeito abrangente de vegetação, fenômenos meteorológicos (principalmente chuvas), terreno (declividade, orientação de vertentes, altitude e diferenciação geográfica) e atividades agrícolas em diferentes escalas.

Tabela 7: Coeficientes do modelo de umidade do solo com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Ouricuri-PE.

Variáveis independentes	$\beta$	R
P	- 0,21	+0,5308 <sup>CM</sup>
Tmax	+ 0,486	-0,2839 <sup>Cf</sup>
Tmin	+0,224	-0,0929 <sup>CBf</sup>
N	+0,323	-0,4154 <sup>CM</sup>
E	- 0,060	-0,6964 <sup>CF</sup>
T	- 0,092	-0,2646 <sup>Cf</sup>
UR	+0,705	+0,6399 <sup>CM</sup>
Vv	- 0,62	-0,6569 <sup>CM</sup>
$\alpha = 0,414$ $r = 0,86^{CF}$ $R^2 = 0,74$ $p < 0,001$		
Erro Padrão de estimativa: 0,1166		

Tabela 8: Coeficientes do modelo de umidade do solo com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r) e Erro Padrão de estimativa para Arcoverde-PE.

Variáveis independentes	$\beta$	R
P	- 0,070	+0,5308 <sup>CM</sup>
Tmax	- 0,810	-0,2839 <sup>Cf</sup>
Tmin	- 1,200	-0,0929 <sup>CBf</sup>
N	+0,220	-0,4154 <sup>CM</sup>
E	- 0,850	-0,6964 <sup>CF</sup>
T	+ 1,160	-0,2646 <sup>Cf</sup>
UR	- 0,410	+0,6399 <sup>CM</sup>
Vv	+ 0,104	-0,6569 <sup>CM</sup>
$\alpha = 2,146$ $r = 0,82^{CF}$ $R^2 = 0,68$ $p < 0,0025$		
Erro Padrão de estimativa: 0,6583		

P = Precipitação (mm); T = Temperatura média do ar (°C); Tmax e Tmin = Temperaturas máxima e mínima do ar (°C); N = Insolação (horas); E = evaporação (mm); UR = Umidade relativa do ar (%); Vv = Velocidade do vento(km/h). CBf = Correlação Bem fraca; Cf = Correlação fraca; CM = Correlação Moderada; CF = Correlação Forte.

Dessa forma observa-se que a relação entre o índice de umidade com a precipitação e a umidade relativa do ar é proporcional, ou seja, há uma dependência entre a umidade da superfície do solo com a água proveniente da chuva como também da água que está no ar.

O sensoriamento remoto é uma ferramenta muito importante que pode ser utilizada para determinar índices importantes que ajudam na avaliação de áreas em processo de degradação e auxiliam na sua quantificação. Como também a geração de modelos de índices

que fazem a estimativa de quais parâmetros e variáveis são importantes para o estudo dessas áreas.

## 6. CONCLUSÕES

- O zoneamento do índice de aridez permitiu identificar possíveis núcleos de aridez em alguns Municípios da mesorregião do Sertão pernambucano;
- A classificação por fatiamento do índice de vegetação por diferença normalizada do sensor MODIS permitiu afirmar que a cobertura das terras da mesorregião do Sertão pernambucano apresentou significativas mudanças no que diz respeito ao seu padrão de proteção dada pela cobertura vegetal, indicando que a classe de alta proteção foi suprimida, seguida de uma expansão da classe moderadamente baixa (mistura de solo exposto com vegetação rasteira);
- O índice de umidade da superfície do solo relacionou-se linearmente muito bem com o NDVI e a  $T_s$  obtidas dos produtos do sensor MODIS para o município de Arcoverde - PE. A relação entre o índice de umidade do solo com evaporação e velocidade do vento foi moderadamente, porém inversa;
- Os modelos de regressões múltiplas podem ser utilizados para estimar do índice de umidade da superfície do solo a partir de dados meteorológicos dos municípios de Ouricuri-PE e Arcoverde-PE para os anos de 2006 e 2012.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGAM, N., KUSTAS, W. P., ANDERSON, M. C., LI, F., NEALE, C. M. U. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sens Environ.* n. 107, p. 545–558, 2007.
- AGUIAR, J.V. Parâmetros físico-hídricos de um solo sem cobertura vegetal e avaliação do MUSAG. Piracicaba: ESALQ,1997. Tese Doutorado.
- ALMEIDA, A. J. P.; GUIMARÃES JUNIOR, S. A. M.; ANDRADE, E. L.; FERREIRA NETO, J. V. Relação entre o Índice de Vegetação e a Temperatura de Superfície na estimativa e identificação das ilhas de calor na cidade de Maceió-AL. In: *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil. Abril de 2015, INPE.
- ALMEIDA, D. C.; TAVARES, D. S.; JESUS, E. S. Uma percepção do processo de desertificação no semiárido nordestino. In: *I Seminário Nacional de Geoecologia e Planejamento Territorial e IV Seminário do GEOPLAN*. Universidade Federal de Sergipe. 2012.
- AMORIM, S. G. de. Notas para uma visão política sobre as atividades de sensoriamento remoto: algumas implicações antropológicas e filosóficas da construção, interpretação e representações do espaço em termos de territórios digitais. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 1393-1399.
- ANDRADE, M. C. A Problemática da Seca. Recife, PE: Líber. 94p. 1999.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N. Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 36, n.2, p.143-151, 2005.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em Bacia Hidrográfica da Serra da Mantiqueira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.1257-1266, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n12/02.pdf>> Acesso em: 28 de jul. 2015.
- BAIER, W.; ROBERTSON, G.W. The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.5, p.17-31, 1968.
- BARKER, J.L.; HARDEN, M.K.; ANUTA, E.A.; SMID, J.; HOUGHT, D. MODIS spectral sensitivity study: requirements and characterization. Washington: Nasa, Oct, 1992, 84p.
- BARROS, K. O. Índice de aridez como indicador de susceptibilidade á desertificação na mesorregião de Minas. Monografia. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brasil. 2010.
- BAUP, F.; MOUGIN, E.; ROSNAY, P. de; TIMOUK, F.; CHÊNERIE, I. Surface soil moisture estimation over the AMMA Sahelian site in Mali using ENVISAT/ASAR data. *Remote Sensing of Environment*, v.109, p.473-481, 2007.



BEZERRA, J.M; SILVA, P.C.M.S.; MORAIS, C.T.S.L.; BATISTA, R.O. Utilização de geotecnologias na determinação de áreas susceptíveis a desertificação no Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geografia Física*, n.3, p.543-561, 2011.

BORATTO, I. M. P; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p.7345-7352.

BRAGA, C. C.; NEVES, D. G.; BRITO, J. I. Estimativa da fração vegetação no leste da Bahia no período de 1982 a 1999. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, n.1, p.149-157, 2003.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil. Brasília: MMA. 2004.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Geoprocessamento para projetos ambientais. 2.ed. INPE. São José dos Campos, 194p. 1998. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap10-aplicacoesambientais.pdf>> Acesso em: 28 de jul. 2014.

CARVALHO, V. C. Abordagem multiescala para o monitoramento de indicadores do processo de desertificação. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Anais... São José dos Campos: INPE, 2001, p. 1539-1551. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.09.07/doc/1539.1551.161.pdf>> Acesso em: 14 de janeiro de 2015.

CEPED-Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Histórico de Secas no Nordeste do Brasil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/historico-de-secas-no-nordeste-do-brasil/>. Acesso: 20 de maio de 2016.

COLVILLE, P. G. Condicionantes climáticas desertificação. Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade de Talca, Chile, 1987.

COURAULT, D. SEGUIN, B. OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*, v. 19, n. 3-4 p. 223–249, 2005.

DANFENG, S.; DAWSON, R.; BAOGUO, L. Agricultural causes of desertification risk in Minqin, China. *Journal of Environmental Management*, v.79, p.348–356, 2006.

DAS, N. N.; MOHANTY, B. P. Temporal dynamics of PSR-based soil moisture across spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02: A wavelet approach. *Remote Sensing of Environment*, v.112, p.522-534, 2008.

DEVORE, J. L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo, SP: Thomson Pioneira, 2006. 706 p.

DOUSSET, B.; GOURMELON, F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n. 58, p. 43-54, 2003.

DUANYANG, X.; XIANGWU, K.; DONGSHENG, Q.; DAFAN, Z.; JIANJUN, P. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale – A case Study in the Ordos Plateau, China. *Sensors*, v.9, p.1738-1753, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006, 306p.

EPIPHANIO, 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 brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FEITOSA, R. D.; ARAÚJO, S. M. S. de. Degradação das terras nos municípios da Área de Proteção Ambiental do Cariri Paraibano. X Congresso de Iniciação Científica da UFCG. Campina Grande, 2013.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ R. L. DA; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. Índices para a Quantificação da Seca. Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás, GO. 2009.

FERREIRA, H. S.; SILVA, H. A.; OLIVEIRA, T. H.; NETO, R. X. M.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. (2011). Avaliação dos parâmetros biofísicos da vegetação de caatinga e agricultura irrigada do município de Petrolina – PE através do NDVI, NDWI e Temperatura da Superfície. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. Anais... Curitiba: INPE, 2011, p.1843-1851.

FERREIRA, D. G.; RODRIGUES, V.; PEREIRA, J.; LIMA, M. G. A desertificação no Nordeste do Brasil II: diagnóstico e perspectiva. In: CONFERÊNCIA NACIONAL E SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DA DESERTIFICAÇÃO, 1994. Fortaleza: Fundação Grupo Esquel Brasil, 1994. 54p.

FRIEDL, M. A., SULLA-MENASHE, D., TAN, B., SCHNEIDER, A., RAMANKUTTY, N., SIBLEY, A., and HUANG, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114, 168–182.

GALVÃO, A. L. C. O. & SAITO, C. H. Mapeamentos sobre Desertificação no Brasil: uma análise comparativa. 2003. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10225/1/ARTIGO\\_MapeamentosDesertificacaoBrasil.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10225/1/ARTIGO_MapeamentosDesertificacaoBrasil.pdf)> Acesso em: 14 de janeiro de 2015.

GREENWOOD, P. (1998). O livro definitivo de dicas & sugestões de jardinagem NBL Editora [S.l.] p. 192.

GOETZ, S.J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, n.18 , v. 1, 1997. p.71-94.

GOULART, A. C. de O. Relação entre Índices de Vegetação e a Precipitação Pluviométrica no município do Rio De Janeiro. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro/Instituto De Florestas. (Monografia). Seropédica – RJ. 2013. Disponível em: < [www.if.ufrj.br/inst/monografia/2013I/anagoulart.pdf](http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/2013I/anagoulart.pdf)> Acesso em: 29 de jul. 2014.

HA, K.; OH, H. e KIM, K. Inter – Annual and Intra – Annual Variabilities of NDVI, LAI and Ts Estimated by AVHRR in Korea. Korea Journal of Estimated by AVHRR in Korea. Korea Journal of Remote Sensing. 2, 111-119. 2001.

HEMAKUMARA, M., J. D. KALMA, J. P. WALKER G. WILLGOOSE. Downscaling of low resolution passive microwave soil moisture observations. 2007. In: 2º Workshop Internacional CAHMDA sobre o Ciclo da Água Terrestre: Modelagem e Assimilação de dados através de escalas de captação, editado por A. J. Teuling et al., p. 67-71, Wageningen University, Wageningen, Países Baixos.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of the Environment, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, Nov. 2002.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Série Histórica - Dados Horários – Mesorregião do Sertão de Pernambuco. Consultado em 08 de maio de 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico de 2000: características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Brasil: Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro, 2004. Escala 1 : 5 000 000.

JENSEN, J. R. (1949) Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres / tradução José Carlos Neves Epiphany et al. São José dos Campos. SP. 2009

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B.K.; ROVER, J. On the terminology of the spectral vegetation index (NIR - SWIR)/(NIR+SWIR). International Journal of Remote Sensing, v.32, p.6901-6909, 2011. DOI: 10.1080/01431161.2010.510811.

JONG, R. de; BRUIN, S. de; WIT, A. de; SCHAEPMAN, M.E.; DENT, D.L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. Remote Sensing of Environment, v.115, p.692-702, 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.011.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P., MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. Remote Sensing of Environment, v. 83, n.1-2, Nov. p 3 –15, 2002.

JUSTICE, C.O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. Remote Sensing of Environment, v. 83, n. 1-2 :p. 244-26, 2002.

KATRA, I.; BLUMBERG, D. G.; LAVEE, H.; SARAH, P. Topsoil moisture patterns on arid hillsides - Micro-scale mapping by thermal infrared images. *Journal of Hydrology*, v.334, p.359-367. 2007.

KITE, G.; PIETRONIRO, A. Remote Sensing application in hydrological modeling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 41, n.4. 1996.

KOSTER, R. D., AND M. J. SUAREZ. Soil moisture memory in climate models, *J. Hydrometeorol.*, 2, 558 – 570, 2001.

LEEUWEN, W.J.D. van; ORR, B.J.; MARSH, S.E.; HERRMANN, S.M. Multi-sensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, v.100, p.67-81, 2006.

LISITA, A. SANO, E.E.; DURIEUX, L. Detecção de plantios de *Cannabis Sativa* no Semiárido Pernambucano a partir da análise das anomalias de dinâmica temporal dos Índices de Vegetação Derivados do Satélite Spot-5 Hrg. *Boletim de Ciências Geodésicas*, sec. Artigos, Curitiba, v. 19, n° 1, p.45-64, jan-mar, 2013.

LIU, A.; WANG, J.; LIU, Z.; WANG, J. Monitoring desertification in arid and semi-arid areas of China with NOAA-AVHRR and MODIS data. China's Special Funds for Major State Basic Research Project, 2005.

LOPES, H. L.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. DO C. M.; PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.1210–1219, 2010

LOPES, H. L.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B. da; SOBRAL, M. C. M.; FILHO, J. C. A.; CANDEIAS, A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. vol.15 no.9, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n9/14.pdf>> Acesso em: 28 de jul. 2014.

LOPES, P. M. O.; MOURA, G. S. S. Estudo de Caso: Índice de Umidade do Solo utilizando Imagens do Sensor Modis para o município de Belém do São Francisco, PE. In: *I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro*, Campina Grande – PB. 2013.

MAFFRA, C. Q. T. MODELAGEM DA UMIDADE DO SOLO A PARTIR DE DADOS MULTIESPECTRAIS DOS SISTEMAS LANDSAT, ASTER E MODIS. Tese de Doutorado. 2004. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba – Paraná.

MAINGUET, M. Stratégies de combat contre la degradation de l'environnement dans les écosystèmes secs: les responses des Nations Unies, de la C.E.I., de la Chine et du Sahel. In *Bull. Assoc. Géograph. França*, Paris, 1992. n.5 p. 422-433.

MATALLO JUNIOR, H. A desertificação no mundo e no Brasil. In: SCHENKEL, C. S. e MATALLO JR, H (Org). *Desertificação*. Brasília: UNESCO, 2003.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília – DF. 2012.

MERLIN, O.; JACOB, F.; WIGNERON, J-P; WALKER, J. P.; CHEHBOUNI, G. 2012. Multidimensional Disaggregation of Land Surface Temperature Using High-Resolution Red, Near-Infrared, Shortwave-Infrared, and Microwave-L Bands. IEEE Transações em Geociências e Sensoriamento Remoto, doi:10.1109/TGRS.2011.2169802.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretária de Recursos hídricos. Programa de Ação Nacional de Combate á Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN BRASIL. 2004.

NICÁCIO, R. M. Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro/RJ. 2008.

NOBRE, C. A.; MASSAMBANI, O.; LIU, W. T. Variabilidade climática na região semiárida do Brasil e monitoramento de secas através de satélite. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semiáridas – ICID, 1992, Fortaleza/CE. Anais...Fortaleza: ICID, 1992. p.3159-3195.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D., SILVA, B. B.; MACHADO, C. C. C.; GALVÍNCIO, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. 2012. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, n.9, 1209-1217.

PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A. DE; COSTA, J. R. M.; DIAS, J. M. Regeneração natural em um remanescente de caatinga sob diferentes níveis de perturbação, Agreste Paraibano. Acta Bot. Bras, São Paulo, vol.15, n.3, set/dez. 2001.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente – SECTMA. Política estadual de controle da desertificação. Recife: SECTMA, 2003.  
Portal Brasil (2016). Tipos de solos. <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2009/11/corporosidade-e-textura-determinam-tipo-de-uso-dos-solos>.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. 2. ed. São Paulo: [s.n.]. 2012. p.176  
REIS, A.S.Z. Desertificação e segurança na Região Mediterrânea. In: I Conferencia Lusófoa sobre o Sistema Terra. Lisboa, Portugal. 2006.

RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, R.D.V. Índices de vegetação MODIS aplicados na discriminação de áreas de soja. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.47, p.13171326, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900017.

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

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. College Station: Texas A&M University, 1974. 87p.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. O Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

RUNNING, S.W.; JUSTICE, C.W.; SALOMONSON, V.; HALL, D.; BARKER, J.; KAUFMAN, Y.; STRAHLER, R.; MULLER, J.P.; VANDERBILT, V.; WAN, Z.M.; TEILLET, P.; CARNEGGIE, D. Terrestrial Remote Sensing Science and Algorithms planned for EOS/MODIS. International Journal of Remote Sensing, Special Issue on creating global datasets: Experience with AVHRR, 1994.

SÁ, I. B.; ANGELOTTI, F. Degradação ambiental e desertificação no Semiárido brasileiro. In: ANGELOTTI, F. et al. (Org.) Mudanças climáticas e desertificação no Semiárido brasileiro. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido; Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2009.

SÁ, I.B.; CUNHA, T.J.F.; TEIXEIRA, A.H.C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND, M.A. Processo de desertificação no semiárido brasileiro. In: SÁ, I.B.; SILVA, P.C.G. (Orgs.). Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa semiárido, 2010. p.125-158.

SALOMONSON, V.V.; BARKER, J.L. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. In: Annual AAS Guidance and Control Conference, 15., Keystone, CO, Feb. 8-12, 1992. Proceedings. Keystone: AAS, 1992.

SALOMONSON, V.V.; TOLL, D.L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument. Advances in Space Reserach, v.2, n.3, p.231-236, 1990.

SAMPAIO, E.; SAMPAIO, Y. Desertificação: conceitos, causas, consequências e mensuração. Recife: Editora da Universitária da UFPE, 2002.

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

SAMPAIO, M. S. Desenvolvimento, Avaliação e Aplicação de um Algoritmo para Espacialização Global dos Climas Árido, Tropical e Temperado. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, ICET/FAET/FAMEV/IB/ICHS, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. 2012.

SANTOS, N. B. F. Distribuições Espaciais e Temporais de Temperaturas de Superfície no Bioma Cerrado: Uma Análise Integrada a Partir de Dados Orbitais de Resolução Moderada. Tese de Doutorado. Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais. Goiânia, julho de 2010. p. 33.

SANTOS, F.; AQUINO, C. Análise da Dinâmica do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), dos Aspectos Econômicos e suas relações com a Desertificação/Degradação Ambiental em Castelo do Piauí. Piauí, Brasil. Revista Electrónica de Investigación e Desenvolvimento, Nº 4, Junho de 2015.

SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, n.4, p.547-553, 2005.

SILVA, M. R.; RIBEIRO, M. G.; CENTENO, J. A. S.; Monitoramento de estiagens com imagens MODIS. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Abril, 2007. Florianópolis, SC, Anais... 2007

SILVA, A. P. N.; MOURA, G. B. A.; GIONGO, P. R.; SILVA, A. O. Dinâmica Espaço Temporal da Vegetação no Semiárido de Pernambuco. Revista Caatinga, v.22, n.4, p.195-205, 2009.

SILVA, H.P. Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semiárido de Pernambuco a partir de imagens de satélite. Doutorado em Ciência do solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, maio de 2009. 153p.

SOARES, A.M.L.; LEITE, F.R.B.; LEMOS, J. de J.S.; MARTINS, M.L.R.; MAYORGA, R.D.; OLIVEIRA, V.P.V. de. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no estado do Ceará – Brasil. In: Conferência Internacional sobre Impactos de Variações Climáticas e Desenvolvimento Sustentável em Regiões Semi-Áridas – ICID, 1992, Fortaleza/CE. Anais... Fortaleza: ICID, 1992. p.1-24.

SOARES, D. B. et al. Geoprocessamento e sensoriamento remoto como ferramentas de identificação de áreas em processo de desertificação. In: GALVÍNCIO, J. D (org). Mudanças climáticas e impactos ambientais. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010.

SOUZA, V. A. Utilização de Técnicas de Sensoriamento Remoto para a Estimativa da Evapotranspiração em uma Cultura de Arroz Irrigado. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre/RS, Brasil. 2013.

SRP (2016) - Solos de Referência de Pernambuco: Coleção Mateus Rosas Ribeiro. Disponível em < <http://www.colecaomateusrosas.com.br/home/ProfessorMateusRosasRibeiro>>, Acesso em 28 de Maio de 2016.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S.; LAMBIN, E.; MOODY, A. MODIS land cover and land-cover change products algorithm theoretical basis document (ATBD). Version 5.0, Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston: University, May, 1999, 72p.

SUN WU. An approach to the designing principle of desertification indicators. Journal of Natural Resources. 15(2):160-163, 2000.

THORNTHWAITE, C.W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geogr. Rev.* v.38, p.57-94, 1984.

THORNTHWAITE, C.; MATHER, J. R. The water balance. *Publications in Climatology*, New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.

TRENTIN, R.; DEPPE, F.; LOHMANN, M.; GRASSI, J. Análise comparativa da temperatura de superfície MODIS e temperatura do ar em diferentes situações no estado do Paraná. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7746.

TRICART, J. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. Núcleos de Desertificação no Polígono das Secas. In: ICB. *Universidade Federal de Pernambuco*, 1971, Recife/PE *Anais...* Recife. pp. 69-73.

VIVONI, E. R.; GEBREMICHAEL, M.; WATTS, C. J.; BINDLISH, R.; JACKSON, T. J. Comparison of ground-based and remotely sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04. *Remote Sensing of Environment*. v.112, p.314-325, 2008.

VIGANÓ, H. A.; BORGES, E. F.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. Análise do desempenho dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI a partir de imagem Aster. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.1828.

WANG, H.; LI, X.; LONG, H.; XU, X.; BAO, Y. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: A case study in China's Yongding River basin. *Catena*, v.82, p.135-145, 2010.

WATERLOO, M.J. Water and nutrient dynamics of *Pinus caribaea* plantation forests on former grassland soils in SW Viti Levu, Fiji., June, Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, 1994. 478 p.

WEISS, J. M. MODIS Reprojection Tool Users Manual. Release 3.3a. Sioux Falls - SD, January 2006. Disponível em: . Acesso em: 15 Jul 2007.

YICHANG, W.; FANG, Z.; LIPING, Z.; LINGLING, K.; XIAOQIANG, L. Estimating soil moisture in semi-arid region by remote sensing based on TM data. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v.1, p.1-5, 2010.

ZENG, Y.; FENG, Z.; XIANGA, N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM + temperature/vegetation index in semiarid environment. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v.6, p.4036-4039, 2004.

ZHAN, Z.; QIN, Q.; WANG, X. The application of LST/NDVI index for monitoring land surface moisture in semiarid area. *IEEE Transactions on geosciences and Remote Sensing*, v.3, p.1551-1554, 2004.