

ALLYSSON LYRA COSTA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA REGIÃO DE
ARARIPINA – PERNAMBUCO COM TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO
REMOTO**

RECIFE

2014

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA REGIÃO DE
ARARIPINA – PERNAMBUCO COM TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO
REMOTO**

ALLYSSON LYRA COSTA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: **Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RECIFE

Abril/2014

Ficha catalográfica

C837d Costa, Allysson Lyra
Determinação de parâmetros biofísicos na região de Araripina – Pernambuco com técnicas de sensoriamento remoto / Allysson Lyra Costa. – Recife, 2014.
67 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2014.
Referências.

1. Semiárido 2. SEBAL 3. CASA I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque, orientador II. Título

CDD 631.1

ALLYSSON LYRA COSTA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA REGIÃO DE
ARARIPINA – PERNAMBUCO COM TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO
REMOTO**

Dissertação defendida e aprovada em 17 de abril de 2014 pela Banca
Examinadora:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura – UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva – UFPE
Examinador

Prof. Dr. Ênio Farias França e Silva – UFRPE
Examinador

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes – UFRPE
Examinador

“Precisamos perseguir nossos mais belos sonhos. Desistir é uma palavra que tem que ser eliminada do dicionário de quem sonha e deseja conquistar. Não se esqueça de que você vai falhar 100% das vezes em que não tentar, vai perder 100% das vezes em que não procurar, vai estacionar 100% das vezes em que não ousar caminhar”.

(Augusto Cury)

“O Senhor é o meu pastor e nada me faltará”.

(Salmos 23)

Aos meus pais, Ambrózio e Alzenir.
Por terem me dado a vida.
Por terem sempre me incentivado e ajudado em tudo.
Amo vocês.
Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu grande e eterno Deus, por ter me concedido o dom da vida e por mais essa vitória.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização deste mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A minha família, pela educação e orientação que me foi dada ao longo da vida; pelo apoio, carinho e compreensão, em especial ao meu pai Ambrósio e minha mãe Alzenir, que sempre me incentivaram e acreditaram em mim; aos meus irmãos (Alícia, Adisson e Raphael) pelo apoio e incentivo.

Às minhas tias e tios que sempre me deram apoio e me ajudaram no que foi preciso.

À minha namorada Aline Lucena, que compartilhou comigo esse período, dedicando suas (e nossas) horas corrigindo, formatando e, principalmente, me incentivando no cansativo processo que é o desenvolvimento de uma dissertação. Agradeço-a por todos os beijos e puxões de orelha, necessários para a continuidade deste trabalho.

Ao prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura, pela orientação atenciosa, por todo apoio, disposição, confiança e amizade.

Ao prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes, pela disponibilidade, sugestões, atenção e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola e de Agronomia, pela importante contribuição com minha formação profissional. E a todos os

outros professores que fizeram parte da minha vida de estudante e que transmitiram seus conhecimentos para que eu pudesse chegar nesse momento.

Agradeço também aos meus amigos e colegas da UFRPE que sempre torceram por mim e me apoiaram no decorrer da minha vida de estudante, especialmente Thaisa, Bárbara, Giselle, Vera Nívea, Gabriel e a todos os meus amigos, os quais felizmente a lista é numerosa, agradeço pelo companheirismo, apoio, cumplicidade, grupos de estudo e bons momentos de descontração.

Aos amigos do grupo de pesquisa que colaboraram diretamente para realização desse trabalho: Marcos, Anderson (Bob), Wellington, Diogo e Rochele.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho e que contribuíram ou contribuem para a minha formação profissional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
RESUMO	15
ABSTRACT.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. Sertão de Pernambuco	19
2.2. Bioma Caatinga	20
2.3. Sensoriamento Remoto	21
2.4. Radiação Fotossinteticamente Ativa	23
2.5. Biomassa	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Área de estudo	25
3.2. Dados orbitais.....	27
3.3. Dados meteorológicos	30
3.4. Determinação da Biomassa Vegetal Seca	31
3.4.1. SEBAL	31
3.4.1.1. Fluxo de Calor no Solo - G	34
3.4.1.2. Fluxo de Calor Sensível - H.....	35
3.4.1.3. Fluxo de Calor Latente - LE.....	41
3.4.1.4. Evapotranspiração real diária – ET_{24h}	41
3.4.2. O algoritmo CASA.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5. CONCLUSÕES.....	56
6. REFERÊNCIAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Biomas do Brasil. Fonte: IBGE, 2013.	20
Figura 2. Localização da Mesorregião do Sertão e do município de Araripina, PE.....	26
Figura 3. Análise comparativa das classes de uso das terras. Araripina-PE. ..	26
Figura 4. Imagens de satélite do sensor TM, satélite Landsat 5, órbita/ponto 217/65 para o município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	27
Figura 5. Fluxograma: Esquema representativo das etapas computacionais para obtenção do saldo de radiação, utilizando-se o SEBAL.	31
Figura 6. Fluxograma: Etapas do processo iterativo para estabilização da resistência aerodinâmica, segundo a teoria de Monin-Obukhov.	36
Figura 7. Regime de precipitação pluviométrico (mm) da estação meteorológica, referente ao período de 1 de maio a 31 de julho para o ano de 2003 (a) e ao período de 1 de março a 30 de junho de 2011 (b), com o apontamento dos períodos de obtenção das imagens orbitais.....	46
Figura 8. Precipitação mensal no município de Araripina – PE.	46
Figura 9. Carta do albedo à superfície (α_{sup}) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.	49
Figura 10. Carta do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	50
Figura 11. Carta do saldo de radiação solar instantâneo (R_{nins} , $W.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	51
Figura 12. Carta do saldo de radiação solar diário (R_{n24h} , $MJ.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	52
Figura 13. Carta da evapotranspiração diária (ET_{24h} , $mm.dia^{-1}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	53
Figura 14. Carta da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA, $W.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011. ..	54
Figura 15. Carta da Biomassa seca (Bio, $g.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis utilizadas no cálculo do balanço de energia, balanço de radiação e suas componentes, obtidas das imagens e da estação meteorológica automática.	28
Tabela 2. Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações. Fonte: Engesat (2013).	29
Tabela 3. Etapas do algoritmo SEBAL.	32
Tabela 4. Estatística descritiva dos parâmetros biofísicos estimados para Araripina, PE.	47

LISTA DE SIGLAS

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima
CASA – Carnegie Ames Stanford Approach
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DGI – Divisão de Geração de Imagens
DSA – Dia Sequencial do Ano
ET_{24h} – Evapotranspiração Real Diária
FAO – Food and Agriculture Organization
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPA – Instituto Agrônomo de Pernambuco
IAF – Índice de Área Foliar
LAMEPE – Laboratório de Meteorologia e Recursos Hídrico de Pernambuco
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
ND – Número digital
NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
PE – Pernambuco
PNFF – Parque Nacional de Furna Feia
PROBIO – Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade
Biológica Brasileira
RFA – Radiação Fotossinteticamente Ativa
RFAA – Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
IVAS – Índice de Vegetação Ajustado por Solo
SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land
TM – Mapeador Temático
UC – Unidade de Conservação

LISTA DE SÍMBOLOS

E – Ângulo de Elevação

α – Albedo

α_{toa} – Albedo planetário

α_{sup} – Albedo corrigido de cada pixel

Z – Ângulo zenital solar

z – Altitude de cada pixel em metros

Bio – Biomassa seca

C_p – Calor específico à pressão constante

C – Carbono

Z_{om} – Coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum

a e b – Constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis

K_1 e K_2 – Constantes de calibração da banda termal do sensor TM Landsat 5

σ – Constante de Stefan – Boltzmann

S – Constante solar

k – Constante de Von Karman

ψ_m – Correções de estabilidade para o transporte de momentum

ψ_h – Correções de estabilidade para o transporte de calor

dr – Quadrado da Distância Relativa Terra-Sol em Unidade Astronômica

dT – Diferença de Temperatura

ε – Eficiência do uso da luz

ε_a – Emissividade atmosférica

ε_{NB} – Emissividade no infravermelho próximo (termal)

ε_0 – Emissividade da superfície (visível)

T_1 e T_2 – Escalares de temperatura

FE – Fração Evaporativa

G – Fluxo de calor no solo

LE – Fluxo de calor sensível

CO₂ – Gás Carbônico

gC m⁻² dia⁻¹ – Grama de carbono por metro quadrado dia

°C – Grau Celsius

K – Grau Kelvin

ha – Hectare

IV – Infravermelho

$k_{\lambda i}$ – Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera

ρ – Massa específica

ϵ^* – Eficiência máxima do uso da radiação

m s^{-1} – Metro por segundo

MJ m^{-2} – Mega Joule por metro quadrado

μm – Micrómetro

$R_{\text{sol,inc}}$ – Radiação de onda curta incidente

$R_{\text{sol,inc,24h}}$ – Radiação de onda curta incidente diária

$R_{\text{ol,atm}}$ – Radiação de onda longa incidente

$R_{\text{ol,emi}}$ – Radiação de onda longa emitida

a_i – Radiância espectral mínima

b_i – Radiância espectral máxima

$L_{\lambda i}$ – Radiância espectral de cada banda

α_p – Refletância da própria atmosfera

r_{ah} – Resistência aerodinâmica

R_n – Saldo de radiação

R_{n24h} - Saldo de radiação diário

$R_{n\text{ins}}$ – Saldo de radiação Instantâneo

$R_{s\text{ins}}$ – Radiação solar global instantâneo

T_{sw} – Transmissividade atmosférica

$T_{\text{sw,ins}}$ – Transmissividade Instantânea

T_{ar} – Temperatura do ar

T_{sup} – Temperatura da superfície

u^* – Velocidade de fricção na estação meteorológica

u_2 – Velocidade do vento a 2 metros de altura

u_{200} – Velocidade do vento a 200 metros de altura

W – Watts

W m^{-2} – Watts por metro quadrado

PB – Parâmetros biofísicos

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS NA REGIÃO DE ARARIPINA – PERNAMBUCO COM TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

RESUMO

Técnicas de sensoriamento remoto têm gerado resultados satisfatórios no âmbito dos recursos naturais e proporcionado grandes avanços a estudos de agrometeorologia, bem como aplicações à superfície com diferentes tipos de coberturas. Diante disto, objetivou-se com este estudo determinar a biomassa vegetal como um mecanismo de monitoramento ambiental, através do uso de técnicas de sensoriamento remoto a partir da determinação e avaliação da dinâmica espacial dos componentes do balanço de energia à superfície e radiação fotossinteticamente ativa, no município de Araripina, PE. Para a realização do estudo foram obtidas duas imagens orbitais do sensor TM do satélite Landsat 5, na órbita/ponto 217/65, que incluiu os anos de 2003 e 2011. Foi usado o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), que permitiu a avaliação do balanço de energia à superfície, da evapotranspiração real diária para cada pixel da imagem, que serviu de fonte para a determinação da radiação fotossinteticamente ativa e da biomassa vegetal seca pelo algoritmo CASA (Carnegie Ames Stanford Approach). Nas imagens foram verificadas as possíveis alterações ocorridas na área no período estudado. As imagens foram avaliadas segundo estatística descritiva dos principais momentos estatísticos (média, mediana, variância, máximo, mínimo, moda, desvio padrão e coeficiente de variação). A análise comparativa dos dados de biomassa seca apresentou um aumento nos valores observados, devido à substituição das áreas antes com solo exposto por pastagem e áreas cultivadas. Resultando em médias de 2,08 e 5,69 g.m⁻² para 2003 e 2011 respectivamente.

Palavras-chave: balanço de energia, CASA, satélites, semiárido, SEBAL.

DETERMINATION OF BIOPHYSICAL PARAMETERS IN THE REGION ARARIPINA - PERNAMBUCO WITH REMOTE SENSING TECHNIQUES

ABSTRACT

Remote sensing techniques have generated satisfactory results in the context of natural resources and provided great advances Agrometeorology studies as well as applications to the surface with different types of toppings. Given this, the aim of this study was to determine the plant biomass as a mechanism for environmental monitoring, through the use of remote sensing techniques from the determination and assessment of the spatial dynamics of the components of the surface energy balance and photosynthetically active radiation in the county of Araripina, PE. For the study two orbital images from Landsat TM satellite sensor 5, the path / row 217/65, which included the years 2003 and 2011 were obtained. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) was used, which allowed the evaluation of the surface energy balance, the daily actual evapotranspiration for each pixel in the image, which served as the source for the determination of photosynthetically active radiation and plant biomass by drought (Carnegie Ames Stanford Approach) CASA algorithm. In the images the possible changes in the area during the study period were recorded. The images were evaluated according to descriptive statistics of the main statistical moments (mean, median, variance, maximum, minimum, mode, standard deviation and coefficient of variation). The data analysis comparative of dry biomass showed an increase in the observed values, due to the replacement of areas of soil previously exposed to grazing by and cultivated areas. Resulting in averages of 2.08 and 5.69 g.m⁻² for 2003 and 2011 respectively.

Keywords: energy balance, CASA, satellites, semiarid, SEBAL

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga é o único grande ecossistema natural brasileiro cujos limites estão inteiramente restritos ao território nacional (SILVA et al., 2003), o que significa dizer que grande parte do patrimônio biológico não é encontrado em nenhuma outra parte do mundo (TABARELLI e VICENT, 2003), mas pouca atenção tem sido dada a conservação da heterogeneidade da sua paisagem (SILVA et al., 2003). Segundo Cavalcanti e Araújo (2008), a utilização da Caatinga se fundamenta principalmente em processos extrativistas para a obtenção de produtos de origem pastoril, agrícola e madeireiro.

Promover a conservação da biodiversidade da Caatinga não é uma ação simples, uma vez que grandes obstáculos precisam ser superados. O primeiro deles é a falta de um sistema regional eficiente de áreas protegidas, devido a pouca disponibilidade de Unidades de Conservação de proteção integral do bioma Caatinga (SILVA et al., 2002).

Uma técnica que surge, experimentando significativos avanços, é o sensoriamento remoto, que começou a ser visto como uma ferramenta de grande potencial para a obtenção de informações sobre áreas agrícolas e florestais de extensões variadas, desde pequenas fazendas até regiões, estados ou países (SHIMABUKURO et al., 2009), auxiliando a observação de áreas em processos de desertificação (SÁ et al., 2011).

O sensoriamento remoto tem assumido grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais oferecendo suporte nas previsões de tempo e melhor entendimento das mudanças climáticas, além de auxiliar no planejamento agroecológico. Como consequência, tem-se tornado ferramenta poderosa para a obtenção de informações necessárias ao manejo, gerenciamento e gestão de recursos naturais (CUNHA et al., 2012).

O entendimento da refletância da folha e do dossel vegetal gera vários tipos de informações espacializadas e georreferenciadas sobre áreas agrícolas e florestais, como, por exemplo, a área foliar, a porcentagem de cobertura verde sobre a superfície, a biomassa vegetal, o tipo de cobertura vegetal, os

componentes bioquímicos e os teores de umidade (SHIMABUKURO et al., 2009).

Mudanças no regime pluviométrico podem interferir diretamente na resposta da cobertura vegetal e conseqüentemente, nos componentes do ciclo hidrológico. Desta forma, trabalhos envolvendo sensoriamento remoto, em alguma etapa necessitarão de dados de uma estação meteorológica, seja para validação ou para complementar uma etapa sem os quais não seria possível a realização (CUNHA et al., 2012).

Devido a carência de dados de campo para monitorar os parâmetros biofísicos da Caatinga em região semiárida do Nordeste brasileiro, objetivou-se com este estudo determinar a biomassa vegetal seca como um mecanismo de monitoramento ambiental, através do uso de técnicas de sensoriamento remoto a partir da determinação e avaliação da dinâmica espacial dos componentes do balanço de energia à superfície, da evapotranspiração real diária e pela radiação fotossinteticamente ativa, no município de Araripina, PE. E como os objetivos específicos, tem-se:

- a) Quantificar as componentes do balanço de energia à superfície via sensoriamento remoto;
- b) Determinar a evapotranspiração diária na região de estudo, por meio do uso do algoritmo SEBAL, a fim de expressar o padrão espacial.
- c) Determinar a radiação fotossinteticamente ativa na região de estudo, a fim de obter valores para a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e para a biomassa seca, através do algoritmo CASA.

Foram revisados trabalhos mais relevantes para este estudo, seguidos de uma descrição dos procedimentos de cálculos específicos e dados que foram utilizados. Com a posterior avaliação dos resultados a fim da obtenção das respostas ao trabalho e expondo as conclusões deste estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sertão de Pernambuco

A mesorregião do Sertão Pernambucano é formada por quatro microrregiões (Araripina, Salgueiro, Pajeú e Sertão do Moxotó), detendo um total de 41 municípios. A vegetação predominante nessa mesorregião é a do Bioma Caatinga, que possui três estratos: arbóreo (8 a 12 m), arbustivo (2 a 5 m) e herbáceo (abaixo de 2 m) e caracteriza-se geralmente pela presença de árvores e arbustos densos, baixos, retorcidos, de aspecto seco, de folhas pequenas e caducas e raízes muito desenvolvidas, grossas e penetrantes (MELO, 2011).

A mesorregião, segundo a classificação climática de Köppen, está inserida em uma região com clima do tipo BSw'h' e BSw'h', quente e seco. O clima é tropical tendendo a seco, isso se dá em função da irregularidade da ação das massas de ar (Tropical e Equatorial). O tipo climático BSw'h' se caracteriza como clima semiárido, quente, tipo estepe, com estação chuvosa retardada para outono. O mês mais frio apresenta temperatura superior a 18°C. As mesmas características se observam para o tipo climático BSw'h', no entanto, este tem a estação chuvosa no verão, apresentando um inverno seco e um verão que concentra toda a precipitação anual (ASSIS et al., 2012).

O início das chuvas no Sertão de Pernambuco ocorre em dezembro (extremo oeste) e está associado às Frentes Frias e aos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior. A partir de fevereiro, a Zona de Convergência Intertropical começa a atuar em todo o Sertão, que já se encontra em sua estação chuvosa. Os totais pluviométricos anuais oscilam, geralmente, entre 400 e 800 mm. (PERNAMBUCO, 2006).

A degradação das terras, principalmente nas regiões áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, é um processo ocasionado por vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas, que podem desencadear processos de desertificação (BRASIL, 1998). A utilização da Caatinga na Região do Araripe Pernambucano se fundamenta principalmente em processos extrativistas para a obtenção de produtos de origem pastoril, agrícola e

madeireiro, o que ocasiona a atuação sobre a cobertura vegetal e produz desequilíbrio no meio ambiente, pois remove a proteção do solo (SÁ et al., 2011).

2.2. Bioma Caatinga

Bioma é um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria. O bioma Caatinga (Figura 1) possui uma área de aproximadamente, 844,453 km² e cobre cerca de 9,2% do território brasileiro (IBGE, 2013).

Segundo o Leal et al. (2005) a caatinga é formada por um mosaico de arbustos espinhosos e florestas sazonalmente secas, esta que de acordo com IBGE (2013) se estende pela totalidade do estado do Ceará (100%) e mais de metade da Bahia (54%), da Paraíba (92%), de Pernambuco (83%), do Piauí (63%) e do Rio Grande do Norte (95%), quase metade de Alagoas (48%) e Sergipe (49%), além de pequenas porções de Minas Gerais (2%) e do Maranhão (1%).



Figura 1. Biomas do Brasil. Fonte: IBGE, 2013.

As atividades de mineração constituem-se em atividades transformadoras do meio ambiente. O polo gesseiro do Araripe vem, ao longo dos anos, utilizando-se dos recursos vegetais da Caatinga como elemento principal na calcinação da gipsita, provocando uma total devastação da biota nativa e a sua conseqüente exaustão. A necessidade de um programa adequado de manejo e a restauração da vegetação são elementos fundamentais para a recuperação da área objeto de intervenção Caatinga (SILVA et al., 2003).

Segundo Moreira (2003), o sensoriamento remoto é um exemplo de ferramenta possível de ser utilizada para realizar o levantamento e o reconhecimento da cobertura dos solos, tendo como grande vantagem à possibilidade de obtenção de informações periódicas, além de possibilitar a visão de uma ampla área de estudo e o levantamento do uso do solo em áreas de difícil acesso.

Estudos envolvendo o uso do sensoriamento remoto como ferramenta que auxilia o monitoramento da Caatinga vem sendo realizado, como é o caso de Silva et al. (2009), Silva et al. (2010 a) e Cunha et al. (2012) que estudaram a dinâmica da vegetação desse bioma, por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Sá et al. (2011) utilizaram para avaliar os processos de desertificação da Caatinga na região do Araripe Pernambucano.

2.3. Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a obtenção de imagens e dados da superfície terrestre, por intermédio da captação e do registro da energia refletida e/ou emitida pelos objetos terrestres (FLORENZANO, 2002 e MORAIS, 2002), sendo entendido como o conjunto de atividades que permite a obtenção de informações de objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. A energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida pelos objetos, e assim avaliar suas principais características. Logo, os sensores remotos são ferramentas

indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais (MORAIS, 2002).

Dessa forma, grandes avanços em estudos da agrometeorologia, bem como aplicação em superfícies com diferentes tipos de cobertura, podem ser utilizados para estimativas do saldo de radiação e suas aplicações (GIONGO, 2008).

Segundo Conrad et al. (2007) as técnicas de sensoriamento remoto são altamente satisfatórias para classificar a cobertura do solo em escalas regional e global, e por delinear áreas irrigadas ou padrões de uso do solo em regiões agrícolas. Fortes (2003) evidencia que a estimativa da biomassa vegetal natural ou das culturas agrícolas é uma das mais promissoras aplicações do sensoriamento remoto.

No Brasil as técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para Mapeamento de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros, inserido no Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO). Com base nesse projeto, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais realizou o monitoramento do bioma da Caatinga através do uso de imagens de satélites para a identificação de áreas antrópicas entre os anos de 2002 a 2008 (MMA e IBAMA, 2010). Bezerra et al. (2014) salientam que a necessidade de modelagens de parâmetros (hídricos, edáficos e vegetativos) da superfície e da atmosfera, aumentam devido as mudanças climáticas e a presença de ação antrópica, voltada ao uso e ocupação do solo.

Segundo Gómez et al. (2011) as técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas em estudos temporais de análise das mudanças da cobertura e uso do solo. No Brasil são utilizadas principalmente no monitoramento ambiental (SILVA et al., 2009). Carreiras et al. (2006) e Amiri et al. (2009) evidenciam que existem diversos sensores remotos com resoluções espaciais, temporais e espectrais diferentes, que vêm sendo utilizados para compreensão desses processos. Cunha et al (2012) constataram que o principal interesse dessas aplicações é compreender as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo, e que as imagens do sensor Thematic Mapper (TM), do Satélite Landsat 5, podem subsidiar análises ambientais, uma vez que sua resolução espacial média (30 m) atende às necessidades de trabalhos desta natureza.

O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é um modelo de processamento de imagem de satélites, que define o balanço de energia à superfície, pixel a pixel, para o momento do imageamento, por exigir poucos dados de superfície, o que o faz o mais utilizado na atualidade em diversas regiões do mundo (SILVA e BEZERRA, 2006; Uda, 2012). Suas bases teóricas e computacionais são descritas em Bastiaanssen et al. (1998) e apresentadas em detalhe em Allen et al. (2002); Silva e Bezerra (2006). Mais recentemente, Allen et al. (2007) apresentaram alterações importantes no SEBAL, para emprego do mesmo em áreas montanhosas.

2.4. Radiação Fotossinteticamente Ativa

A Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA), também considerada como radiação solar visível é a principal fonte de energia para a produção de fotossíntese pelas plantas (MOREIRA, 2001). A radiação fotossinteticamente ativa compreende a faixa do espectro da radiação solar de 0,4 a 0,7 μm (MONTEITH, 1972). Diferentes aplicações que lidam com a fisiologia das plantas, produção de biomassa e iluminação natural em estufas requerem conhecimento da RFA (ALADOS et al., 2000).

Stanhill e Fuchs (1977) consideram a razão entre a RFA e a radiação global como uma fração constante. No entanto, diversos estudos têm mostrado que este percentual pode variar em função de diversos parâmetros meteorológicos como temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, turbidez atmosférica, precipitação e condições do céu caracterizadas pelo ângulo zenital solar e cobertura do céu (ALADOS et al., 1999). Entretanto, somente parte da RFA incidente é absorvida e aproveitada no processo fotossintético. Caracterizando-se um parâmetro necessário à modelagem do crescimento das plantas, sendo estimativa, por meio de imagens do satélite Landsat – TM, através de dados de NDVI.

O conhecimento da Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa e Absorvida (RFAA), com relação ao melhoramento de plantas, pode ser um parâmetro muito importante, uma vez que esta variável está intimamente relacionada à produção de biomassa. Como se sabe, entre outros fatores

ambientais que influenciam o crescimento das plantas terrestres, a radiação solar tem um relevante destaque por ser a única fonte de energia para o processo fotossintético (MOREIRA, 2001).

Dados de satélite têm sido utilizados em algoritmos específicos, para fornecer imagens de RFA sobre áreas de cobertura vegetais diversificadas. A fração de RFA absorvida pode ser estimada através de índices de vegetação, os quais são obtidos de medidas dos fatores de refletância nas bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo de satélites como o Landsat 5 – TM e Terra/MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (ASRAR et al., 1984; MYNENI e WILLIAMS, 1994).

Fontana et al. (2012) estimaram a RFAA para cultura da soja, utilizando dados orbitais, provenientes de duas plataformas: Landsat/TM e Terra/MODIS, nesse estudo, concluíram apesar de maior detalhamento espacial (pixel de 30 m), as imagens Landsat/TM revelaram um limitador temporal e que o método aplicado às imagens MODIS possibilita o monitoramento da RFAA ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento da soja e com baixo custo.

2.5. Biomassa

A biomassa representa a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal (SANQUETA, 2002). A biomassa vegetal é constituída por todas as partes das plantas: Troncos, galhos, folhas, flores e frutos na parte aérea, e as raízes na parte subterrânea (LARCHER, 2000). Sendo um dos aspectos mais importantes para caracterizar a estrutura de ecossistemas, pois expressa o potencial de energia e nutrientes da biota em interação com os fatores ambientais (BURGER e DELITTI, 1999).

Para se desenvolverem e acumularem biomassa, as plantas superiores necessitam de energia solar, CO₂, água e elementos minerais (HAAG, 1987). Essa acumulação de biomassa é influenciada pelos fatores que afetam a fotossíntese e a respiração. Os principais são: luz, temperatura, concentração de CO₂ do ar, umidade e fertilidade do solo e doenças (BARICHELLO 2003).

A preocupação com as mudanças globais tem motivado um crescente número de pesquisas, sobretudo com o objetivo de obter informações

confiáveis sobre a biomassa vegetal e conteúdo de carbono na vegetação (MELO, 2006).

A biomassa vegetal pode ser determinada diretamente ou estimada indiretamente. No método direto (destrutivo), toda a vegetação é cortada e pesada. A amostragem para esse método pode ser por árvore individual ou em parcelas fixas (HIGUCHI e CARVALHO Jr, 1994). O método indireto, indicado para grandes extensões florestais, é baseado em inventários florestais e modelos de regressão (SANQUETA, 2002).

As técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas em estudos de vegetação, tanto para análises de áreas extensas quanto para estudos de fisiologia vegetal em laboratório (PONZONI, 2001). Santos (1988) desenvolveu um dos primeiros estudos com aplicação de imagens TM/Landsat-5 para estimar biomassa vegetal do cerrado, chegando a bons resultados com correlações significativas, principalmente com os índices espectrais de vegetação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A região de estudo foi o município de Araripina ($7^{\circ}34'34''$ S e $40^{\circ}29'54''$ W) (Figura 2) situado na Mesorregião do Sertão do estado de Pernambuco, a 683 km da capital do estado, Recife. Com altitude de 622 m e área de 1.847,470 km², tem como principal atividade econômica a produção de gesso, sendo um dos maiores polos gesseiros do país, limitando-se a norte com Estado do Ceará, a sul com Ouricuri, a leste com Ipubi e Trindade, e a oeste com Estado do Piauí (MME, 2005).

O clima predominante da área de estudo é o BSw^h conforme classificação de Köppen. Este tipo climático apresenta-se como quente semiárido, tipo estepe, com a estação chuvosa atrasada para o outono (SÁ et al., 2011).

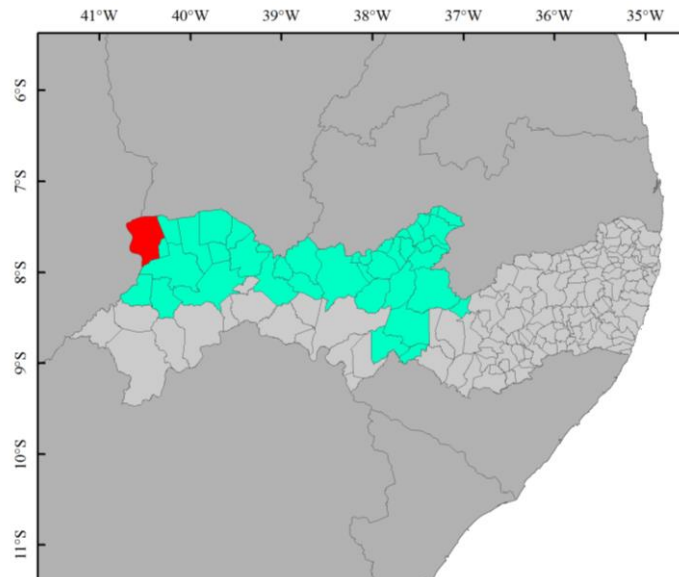


Figura 2. Localização da Mesorregião do Sertão e do município de Araripina, PE.

A vegetação típica do município é a caatinga hiperxerófila, caracterizada como densa, densa a semidensa, semidensa, semidensa a rala (Figura 3) de acordo com análise das classes de uso das terras no município de Araripina foi feita por Fernandes et al., 2013.

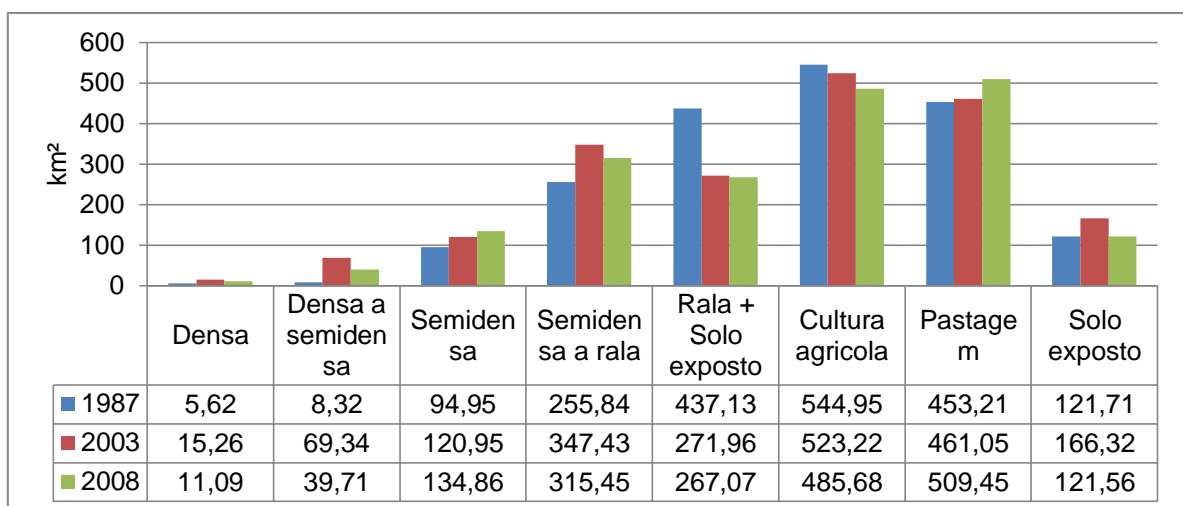


Figura 3. Análise comparativa das classes de uso das terras. Araripina-PE.

3.2. Dados orbitais

As imagens utilizadas foram dos anos de 2003 e 2011 do sensor TM (Thematic Mapper) do Satélite Landsat 5, adquiridas junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013), com distribuição gratuita. E diante da grande disponibilidade de imagens de diferentes datas, os critérios adotados para a escolha das imagens foram: (i) a menor cobertura de nuvens possível e (ii) pertencerem ao mesmo período do ano. Neste sentido foram selecionadas imagens compreendendo a órbita/ponto 217/65 (Figura 4), que recobrem a área de estudo, para as datas apresentadas na Tabela 1. A imagem foi composta por sete bandas espectrais, cujas características estão representadas na Tabela 2.

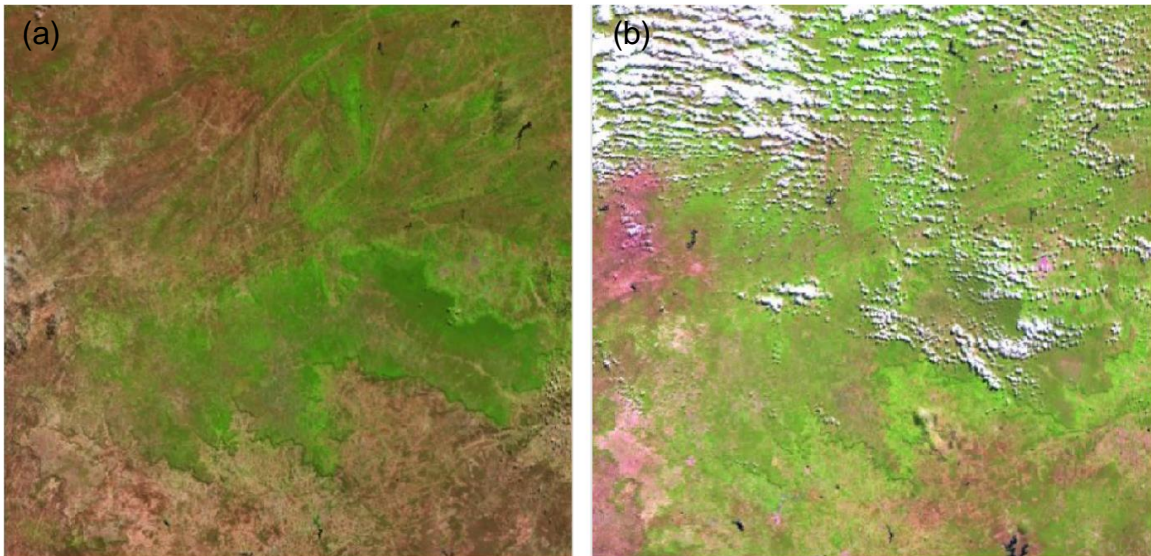


Figura 4. Imagens de satélite do sensor TM, satélite Landsat 5, órbita/ponto 217/65 para o município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Tabela 1. Variáveis utilizadas no cômputo do balanço de energia, balanço de radiação e suas componentes, obtidas das imagens e da estação meteorológica automática.

Data	06.07.2003	10.06.2011
DSA	186	160
E (°)	44,8074	47,9468
Z (°)	45,1926	42,0532
Cos Z	0,704726	0,742523
dr	1,032948	1,032962
HP	12:23:52	12:36:59
UR%	76,9	78,3
Tar (°C)	20,3	21,3
U2 (m.s ⁻¹)	9,00	7,5
T _{SWins}	0,7631	0,7631
T1	0,9996	1,0000
T2	1,0000	1,0000
Rs _{ins} (w.m ⁻²)	278,72	259,17
RFA (w.m ⁻²)	133,78	124,4

DSA: Dia Sequencial do Ano; E: ângulo de elevação do Sol; Z: ângulo zenital solar; HP: (Tempo Central GMT); dr: distância relativa Terra-Sol; Tar: temperatura do ar instantânea; U2: velocidade do vento a 2 metros de altura; Rs_{ins}: radiação solar global diária média; Rs: radiação solar global instantânea; UR%: umidade relativa; RFA: radiação fotossinteticamente ativa; Tsw_{ins}: transmissividade instantânea; T₁ e T₂: contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas.

Tabela 2. Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações. Fonte: Engesat (2013).

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas TM do satélite LANDSAT-5
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta

		sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

3.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos (radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) utilizados para a implementação do modelo SEBAL, foram obtidos juntos ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) e o Laboratório de Meteorologia e Recursos Hídrico de Pernambuco (LAMEPE), originários do estudo das características climáticas da região no período de 1952 - 1993, da estação meteorológica de Araripina (7°29' S e 40°36' W, 816 m). Os dados de

Precipitação pluviométrica foram adquiridos na seção de Monitoramento Pluviométrico do site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

3.4. Determinação da Biomassa Vegetal Seca

3.4.1. SEBAL

Na determinação do saldo de radiação instantâneo a superfície foram utilizados procedimentos empregados no SEBAL (ALLEN et al., 2002; SILVA e BEZERRA, 2006), sintetizado no diagrama esquemático da Figura 5, que representa as etapas de cômputo dos diferentes componentes do balanço de radiação. Informações adicionais sobre a obtenção da radiância, refletância, índices de vegetação, emissividade, temperatura da superfície e albedo podem ser encontradas em Allen et al. (2002). O processamento de imagens (empilhamento, recorte, reamostragem, uso do *Model maker*, entre outras tarefas) foi realizado no software ERDAS IMAGINE 9.1. Seguindo o fluxograma abaixo (Figura 5), e por fim complementado com o refinamento na produção das cartas temáticas com ArcGis versão 10.1.

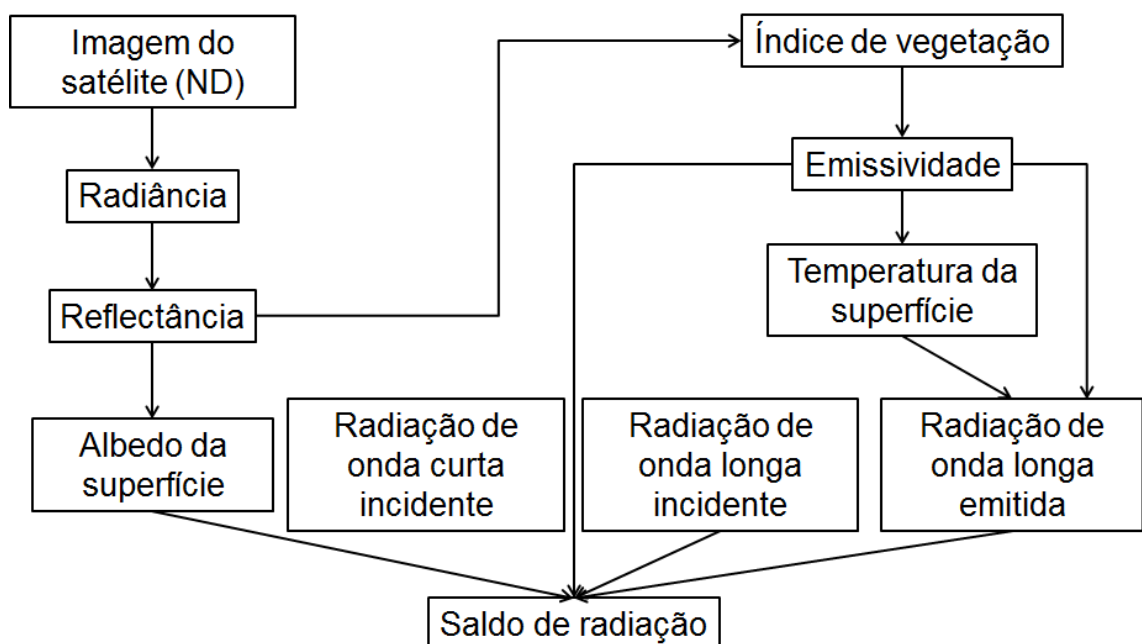


Figura 5. Fluxograma: Esquema representativo das etapas computacionais para obtenção do saldo de radiação, utilizando-se o SEBAL.

A seguir estão descritos as equações de cada modelo matemático adotado para a realização de cada etapa (Tabela 3).

Tabela 3. Etapas do algoritmo SEBAL.

<p>ETAPA 1</p> <p>Calibração Radiométrica</p>	$L_{\lambda i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND \quad (1)$	<p>Em que, a e b são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$); ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); i são as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) do satélite TM Landsat 5.</p>
<p>ETAPA 2</p> <p>Refletância Planetária</p>	$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cos Z d_r} \quad (2)$	<p>$L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda; $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$); Z é o ângulo zenital solar e d_r é a distância relativa Terra-Sol.</p>
<p>ETAPA 3</p> <p>Albedo Planetário</p>	$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (3)$	<p>$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são as refletâncias planetárias das bandas. 1, 2, 3, 4, 5 e 7, respectivamente</p>
<p>ETAPA 4</p> <p>Albedo da Superfície</p>	$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$	<p>α_{toa} é o albedo planetário; α_p é a refletância da própria atmosfera (0,03) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica ($\tau_{sw} = 0,75 + 2.10^{-5}z$); onde z é a</p>

			altitude em metros.
ETAPA 5	$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (5)$		ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do sensor TM Landsat 5.
NDVI IVAS IAF	$IVAS = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (6)$		L é uma variável de valor 0,25 (usado para vegetação densa), 0,5 (usado para vegetação intermediária) e 1,0 (usado para pouca vegetação).
	$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (7)$		
ETAPA 6	$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033IAF \quad (8)$		Para pixels com $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($NDVI < 0$) $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$, conforme recomendações de Allen e al. (2002).
Emissividade	$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF \quad (9)$		
ETAPA 7			$K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ são as constantes de calibração da banda termal do sensor TM Landsat 5. A radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e a emissividade e ε_{NB} .
Temperatura da Superfície	$T_s = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}k_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (10)$		
ETAPA 8			ε_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de Stefan - Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$) e T_{sup} é a temperatura da superfície (K).
Radiação de Onda Longa Emitida	$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 \sigma T_{sup}^4 \quad (11)$		
			S é a constante solar (1367 Wm^{-2}), Z é ângulo

ETAPA 9		zenital solar, d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica.
Radiação de Onda Curta Incidente	$R_{sol,inc} = S \cos Z d_r \tau_{sw} \quad (12)$	
ETAPA 10		ϵ_a é a emissividade atmosférica obtida por: $\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ (ALLEN et al., 2002), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e a T_{ar} é a temperatura do ar (K).
Radiação de Onda Longa Incidente	$R_{ol,atm} = \epsilon_a \sigma T_{ar}^4 \quad (13)$	

O saldo de radiação à superfície R_n (Wm^{-2}) é computado utilizando-se a seguinte Equação (14) do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = R_{sol,inc} (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emit} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0) R_{ol,atm} \quad (14)$$

Em que, $R_{sol,inc}$ é a radiação de onda curta incidente; α_{sup} é o albedo da superfície; $R_{ol,atm}$ é a radiação de onda longa incidente, emitida pela atmosfera na direção de cada pixel; $R_{ol,emit}$ é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ϵ_0 é a emissividade de cada pixel.

3.4.1.1. Fluxo de Calor no Solo - G

O fluxo de calor no solo G (Wm^{-2}) representa a taxa de energia utilizada para aquecimento do solo, ou ainda, pode ser descrito como a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação, devido à condução. Foi estimado segundo a Equação (15) empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000) para condições próximas ao meio dia:

$$G = \left[\frac{T_{sup}}{\alpha} (0,0038 \cdot \alpha + 0,00074 \cdot \alpha^2) (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] Rn \quad (15)$$

Em que: T_{sup} é a temperatura da superfície (°C), α_{sup} é o albedo da superfície e $NDVI$ é o índice de vegetação da diferença normalizada, todos computados pixel a pixel e Rn é o saldo de radiação.

3.4.1.2. Fluxo de Calor Sensível - H

O fluxo de calor sensível H (Wm^{-2}) representa a perda de calor para o ar, através de condução e convecção e foi calculado segundo a expressão (16) para o transporte de calor: (BASTIAANSEN et al.(1998); ALLEN et al. (2002); SILVA e BEZERRA, (2006)).

$$H = \rho c_p \left(\frac{a + bT_{sup}}{r_{ah}} \right) \quad (16)$$

Onde ρ é a massa específica do ar, C_p é o calor específico do ar ($1004 Jkg^{-1}K^{-1}$), a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis Z_1 e Z_2 , T_s é a temperatura da superfície (°C) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}).

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma do processo iterativo para a estabilização de r_{ah} e obtenção do mapa dos valores especializados do fluxo de calor sensível (H).

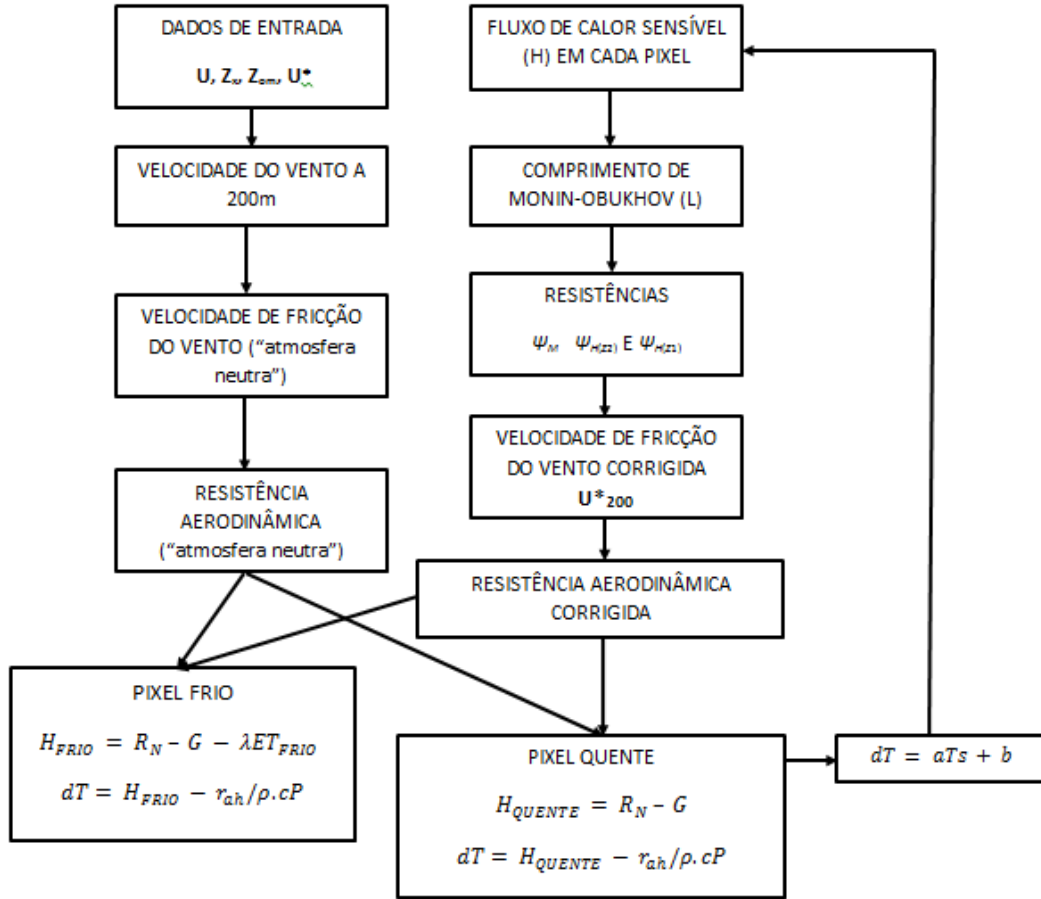


Figura 6. Fluxograma: Etapas do processo iterativo para estabilização da resistência aerodinâmica, segundo a teoria de Monin-Obukhov.

O cômputo de H foi iniciado a partir dos dados de uma estação meteorológica no interior da cena estudada, quais sejam: a velocidade do vento (ms^{-1}) ao nível de Z_m e a altura média da vegetação (m) circundante no local da medição da velocidade do vento. Inicialmente, a resistência aerodinâmica r_{ah} (s.m^{-1}) foi computada admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra (Equação 17):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (17)$$

em que: Z_1 e Z_2 são as alturas em metros acima da superfície (em alguns estudos mais recentes têm sido utilizados $Z_1 = 0,1$ m e $Z_2 = 2,0$ m), u_* velocidade de fricção (m.s^{-1}) e k é a constante de Von Karman (0,41).

Nesta etapa foram reunidas as informações sobre a velocidade do vento u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e a altura média da vegetação h (m) próxima a estação meteorológica. Dessa forma, obteve-se o coeficiente de rugosidade local Z_{0m} em função da altura média da vegetação segundo Equação de Brutsaert (1982), em que: $Z_{0m} = 0,12 h$. A velocidade de fricção u^* ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) é computada usando o perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra pela Equação 18.

$$u_* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (18)$$

em que: k é constante de Von Karman, u_x é a velocidade do vento (ms^{-1}) na altura z e z_{0m} é a coeficiente de rugosidade (m).

Em seguida, considerando-se, ainda, a atmosfera em equilíbrio neutro, foi estimada a velocidade do vento ao nível de $z = 200$ m [u_{200}], chamada de blending height, onde foi assumido que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, foi dada pela Equação 19:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (19)$$

em que: u^* a velocidade de fricção na estação meteorológica.

Com a hipótese de que u_{200} é constante em toda a cena estudada, foi obtida a velocidade de fricção (u^*) para cada pixel da imagem, pela Equação 20:

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)} \quad (20)$$

em que: z_{0m} é o coeficiente de rugosidade da superfície, podendo ser obtido em função do IVAS segundo Equação 21, desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62IVAS) \quad (21)$$

O cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície dT ($^{\circ}\text{C}$) para cada pixel foi computada através de uma relação linear entre dT e T_{sup} (temperatura da superfície) (Equação 22):

$$dt = a + bT_{sup} \quad (22)$$

Onde os coeficientes a e b foram obtidos através dos pixels âncoras (quente e frio), conforme visto na sequência. O pixel “frio” da imagem foi escolhido admitindo-se que este se encontra numa área com umidade presente ou de vegetação densa, onde assumiu-se que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{frio} = 0$) e o fluxo de calor latente LE_{frio} (Wm^{-2}) é dado pela Equação 23:

$$LE_{frio} = R_n - G \quad (23)$$

Por sua vez, o pixel “quente” foi escolhido numa área com grande exposição de solo, onde assumiu-se que o fluxo de calor latente é nulo ($LE_{quente} = 0$) e portanto o fluxo de calor sensível H_{quente} (Wm^{-2}) foi dado por (Equação 24):

$$H_{quente} = R_n - G = \frac{\rho c_p (a + bT_{sup})}{r_{ah}} \quad (24)$$

Onde T_{sup} , R_n , G e r_{ah} foram obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obteve-se, no pixel quente: $a + bT_{sup} = r_{ah}(R_n - G)$. Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $a + bT_{sup} = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilitou o cálculo de a e b . Logo, pode-se obter H .

No entanto, os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de um processo iterativo, e que nas etapas seguintes se considerada, efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel. Dessa forma, devido os efeitos turbulentos afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplicou-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, sendo considerada no cômputo do fluxo de calor sensível em todos os pixels da área de estudo.

O comprimento de Monin-Obukhov L foi utilizado para identificar as condições de estabilidade da atmosfera e computado em função dos fluxos de calor e de momentum pela seguinte Equação 25:

$$L = -\frac{\rho C_p u_* T_{sup}}{kgH} \quad (25)$$

em que: ρ é a densidade do ar ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$), C_p é o calor específico do ar a pressão constante, u_* é a da velocidade de fricção de cada pixel das imagens (ms^{-1}), T_{sup} é a temperatura da superfície (K), g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}), obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade.

Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra. Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) foram considerados. Para isto, utilizam-se das formulações de Paulson (1970) e Webb (1970):

1) Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + X_{(200m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2}\right) - \tan^{-1}(x_{(200m)}) + 0,5\pi \quad (26)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (27)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad (28)$$

Onde,

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L}\right)^{0,25} \quad (29)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (30)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (31)$$

2) Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\Psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{200}{L}\right) \quad (32)$$

$$\Psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right) \quad (33)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L}\right) \quad (34)$$

3) Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\Psi_m = 0$ e $\Psi_h = 0$.

O valor corrigido para a velocidade de fricção u_* (ms^{-1}) é dado por:

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \quad (35)$$

onde: u_{200} é a velocidade do vento a 200 m (m s^{-1}), k é a constante de Von Karman (0,41), Z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\Psi_{m(200m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m.

Tendo obtido u^* corrigido, foi obtido o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (s m^{-1}), pela da Equação 36:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k} \quad (36)$$

onde $z_2 = 2,0$ m, $z_1 = 0,1$ m, e $\psi_{h(z_2)}$ e $\psi_{h(z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente.

Uma vez corrigidos u^* e r_{ah} retornou-se ao cômputo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que foi obtido estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência aerodinâmica (r_{ah}). Foram necessárias 3 iterações na imagem de 2003 e 5 na de 2011, para obter erro relativo de 0,01%.

3.4.1.3. Fluxo de Calor Latente - LE

Estimados o saldo de radiação - Rn , o fluxo de calor no solo - G e o fluxo de calor sensível - H , o fluxo de calor latente - LE (Wm^{-2}) foi então calculado como um residual do balanço de energia (Equação 37):

$$LE = Rn - H - G \quad (37)$$

3.4.1.4. Evapotranspiração real diária – ET_{24h}

A evapotranspiração real diária – ET_{24h} (mm) é obtida ao se considerar que a fração evaporativa instantânea (FE_{ins}) é igual à FE_{24h} (Bastiaanssen et al., 1998; Silva e Bezerra, 2006; Teixeira et al., 2009):

$$FE_{ins} = \frac{LE}{Rn - G} = FE_{24h} = \frac{LE_{24h}}{Rn_{24h}} \quad (38)$$

admite-se que $G_{24h} = 0$. Assim, a LE_{24h} será dada pela equação 39.

$$LE_{24h} = FE_{ins} Rn_{24h} \quad (39)$$

em que LE_{24h} é o fluxo de calor latente diário ($W m^{-2}$) e o saldo de radiação diário – Rn_{24h} ($W m^{-2}$) foi obtido mediante modelo calibrado para condições verificadas no Semiárido brasileiro por Teixeira et al. (2009):

$$Rn_{24h} = R_s(1 - \alpha) - 143\tau_{24h} \quad (40)$$

em que R_s ($W m^{-2}$) é a radiação solar diária medida em estação meteorológica interior à área de estudo e τ_{24h} é a transmitância atmosférica média diária. Para converter o saldo diário – Rn_{24h} em MJ m^{-2} , usado em varias aplicações, multiplicar o Rn_{24h} (Equação 40) pelo fator 0,0864.

E a conversão da LE_{24h} em ET_{24h} ($mm dia^{-1}$) é dada pela equação 41:

$$ET_{24h} = \frac{86400 FE_{ins} Rn_{24h}}{2450000} \quad (41)$$

em que os valores 86400 e 2450000 correspondem à transformação do LE em $mm dia^{-1}$.

3.4.2. O algoritmo CASA

Após a obtenção dos componentes do balanço de radiação e de energia, foram obtidos os valores para a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e para a biomassa seca, através do algoritmo Carnegie Ames Stanford Approach (CASA), que calcula a RFAA, e que junto com os dados de superfície, obtém a estimativa da biomassa (FIELD et al., 1995). A Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA (0,4-0,7 μm), que é parte da radiação solar de ondas curtas incidentes (R_{solinc}) (0,3-3,0 μm) é potencialmente útil para a fotossíntese. A RFA varia principalmente com a visibilidade, a camada de ozônio e a cobertura de nuvens. Entretanto, um valor aceito para representar a RFA deve estar entre 45 e 50% do valor da R_{solinc} em 24 horas. Assim, estima-se a RFA pela Equação 42:

$$RFA = 0,48 \cdot R_{solinc,24h} \quad (Wm^{-2}) \quad (42)$$

Como nem toda a RFA é absorvida, estudos mostram que a Porção Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFAA) se relaciona com a RFA pela seguinte Equação (43):

$$RFAA = 0,0864 \cdot f \cdot RFA \quad (MJm^{-2}) \quad (43)$$

Entretanto, uma aproximação linear de f , que foi derivada matematicamente das refletâncias nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, foi obtida por Bastiaanssen e Ali (2003).

$$f = -0,161 + 1,257 \cdot NDVI \quad (44)$$

Assim, f pode ser definido como a proporção da radiação disponível em faixas específicas do espectro onde a vegetação absorve a radiação fotossinteticamente ativa (Brandão et al., 2007).

Em sequência, foi realizado o cálculo dos escalares de temperatura T_1 e T_2 , dado pelas Equações (45) e (46), respectivamente (FIELD et al., 1995).

$$T_1 = 0,8 + 0,02 \cdot T_{opt} - 0,0005 \cdot T_{opt}^2 \quad (45)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp[0,2 \cdot (T_{opt} - 10 - T_{mon})]} \times \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{mon})]} \quad (46)$$

em que, T_1 é o fator que descreve os efeitos que surgem por causa do ar frio; T_2 é um fator de redução da eficiência do uso da radiação devido ao ar quente; T_{opt} é a temperatura média do ar (°C), durante o mês de máximo índice de área foliar ou NDVI; e T_{mon} é a temperatura do ar média mensal (°C).

Por fim, para obtenção da biomassa seca, foi usado o produto da RFAA pelo fator ε (gMJ^{-1}), que é a eficiência do uso da luz, e é afetada pela umidade do solo, sendo difícil de quantificar devido à sua variabilidade temporal e espacial. Estando relacionada à temperatura de superfície como um indicador

para o teor de umidade (BRADFORD et al, 2005). Assim, ε (gMJ^{-1}) foi determinado considerando as variações sazonais, e também os diferentes biomas, sendo dada por (FIELD et al., 1995):

$$\varepsilon = \varepsilon^* T_1 T_2 \lambda \quad (47)$$

Em que, ε^* é a máxima eficiência do uso da radiação, igual a $2,5 \text{ g MJ}^{-1}$ (SILVA et al., 2012) e λ é a fração evaporativa instantânea. Com a determinação de ε , foi obtida a biomassa vegetal seca (Bio , g.m^{-2}) dada por:

$$\text{Bio} = \text{RFAA} \cdot \varepsilon \quad (48)$$

A Equação (48) é a base do algoritmo CASA, onde foi calculada a biomassa seca através dos dados de sensoriamento remoto, tendo seus valores avaliados sob a influência do NDVI.

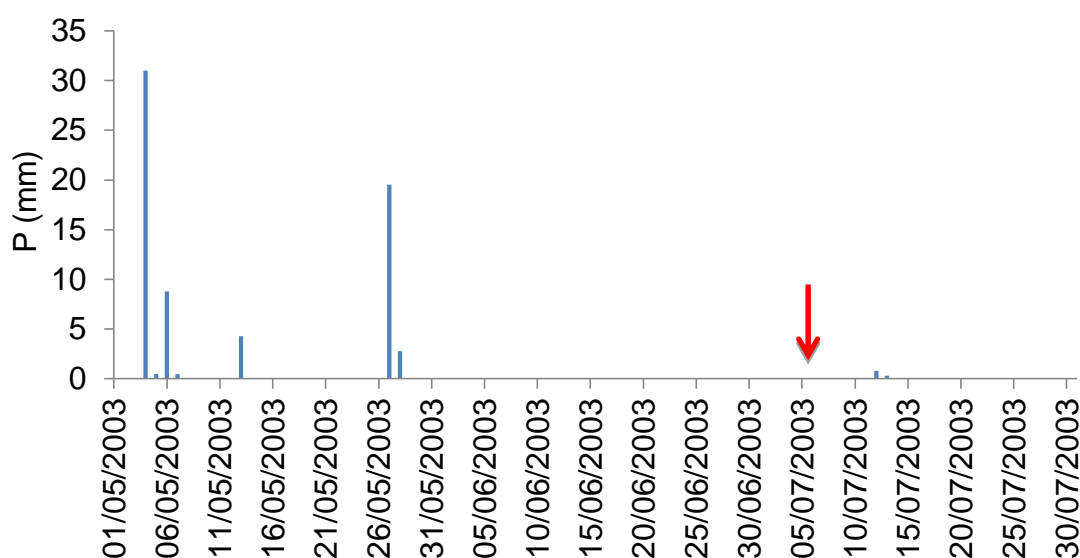
As imagens foram avaliadas segundo estatística descritiva dos principais momentos estatísticos (média, mediana, máximo, mínimo, moda, desvio padrão e coeficiente de variação), segundo Santos (2007) e realizou-se a análise comparativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os regimes de precipitação pluviométrica (mm), referente ao período de 1 de maio a 31 de julho para o ano de 2003 e ao período de 1 de março a 30 de junho de 2011. 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 (SAMPAIO, 2003).

Ressalta-se a influência do decréscimo do evento chuvoso nos dias que antecederam as datas de imageamento (Figura 7), influenciando em menor taxa de produção de biomassa da vegetação, onde em 2003 foram registrados (0; 0; 27,1 mm) para os 15, 30 e 60 dias, respectivamente. Sendo um ano de El Niño de intensidade moderada, caracterizado pela diminuição na ocorrência de chuvas na região Nordeste (CPTEC, 2014). Já no ano de 2011 foi registrado (1,4; 53,8; 112 mm) para os 15, 30 e 60 dias, respectivamente.

a)



b)

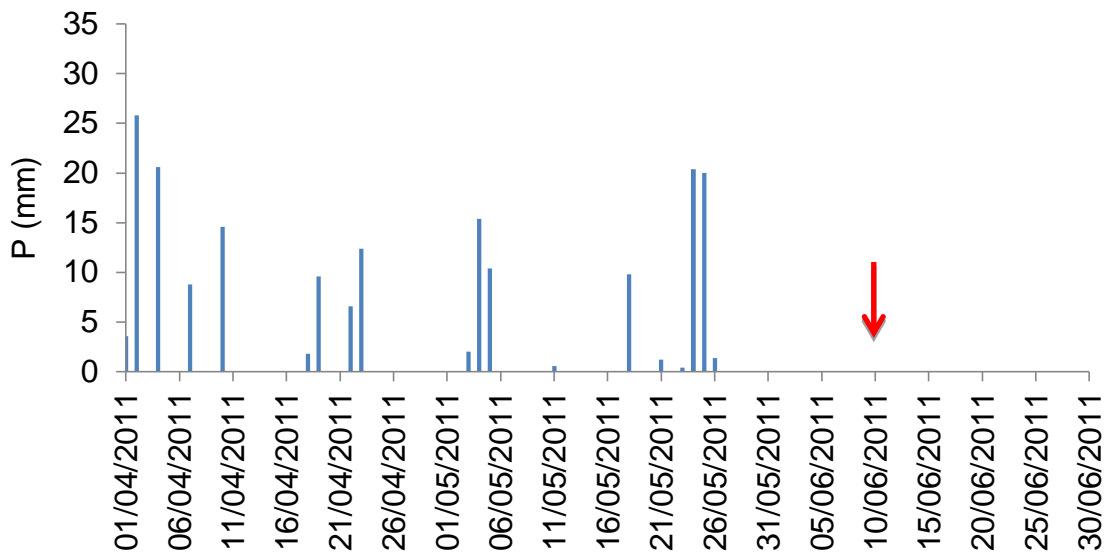


Figura 7. Regime de precipitação pluviométrico (mm) da estação meteorológica, referente ao período de 1 de maio a 31 de julho para o ano de 2003 (a) e ao período de 1 de março a 30 de junho de 2011 (b), com o apontamento dos períodos de obtenção das imagens orbitais.

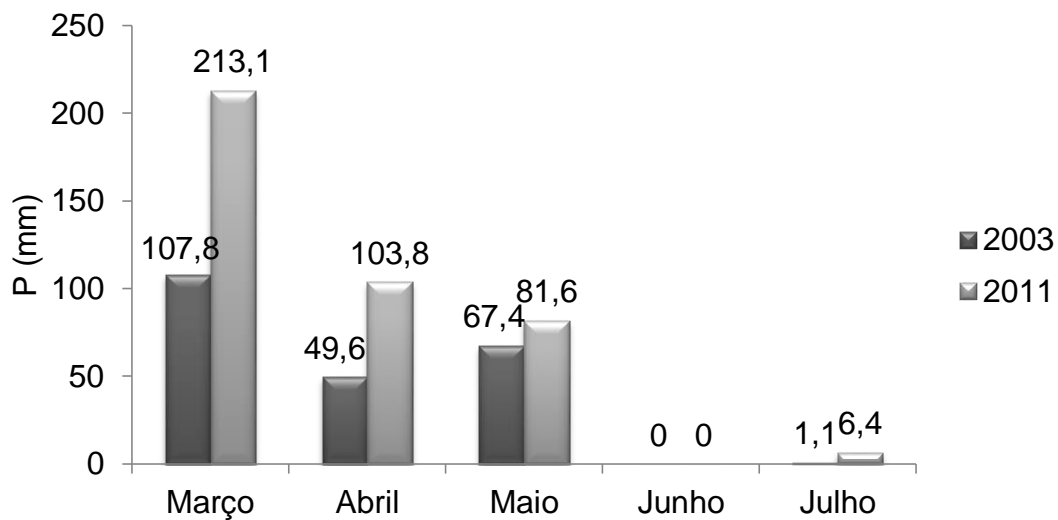


Figura 8. Precipitação mensal no município de Araripina – PE.

Na Tabela 4 constam os valores dos principais momentos estatísticos dos parâmetros biofísicos (albedo da superfície, NDVI, saldo de radiação instantâneo e diário, evapotranspiração diária, radiação fotossinteticamente

ativa absorvida, fração evaporativa e biomassa seca) envolvidos no município de Araripina, PE, conforme delimitado na Figura 2.

Tabela 4. Estatística descritiva dos parâmetros biofísicos estimados para Araripina, PE.

Data	PB	Média	Med	Min	Máx	Moda	DP	CV	%
06.07.2003	Albedo	0,16	0,14	0,01	0,83	0,12	0,05	0,29	29,11
	NDVI	0,32	0,29	-1,00	0,85	0,23	0,13	0,40	39,75
	Rn _{ins}	509,79	515,19	13,40	668,80	533,11	43,30	0,08	8,49
	Rn _{24h}	15,80	16,04	0,83	19,11	16,61	1,02	0,06	6,48
	ETR _{24h}	1,65	1,64	0,00	7,00	0,00	0,98	0,59	59,26
	RFA	32,71	26,97	0,00	121,12	20,34	21,20	0,65	64,82
	FE	0,25	0,25	0,00	1,00	0,00	0,14	0,57	56,63
	Bio	2,08	1,39	0,00	13,18	0,00	2,02	0,97	97,30
10.06.2011	Albedo	0,13	0,12	0,00	0,83	0,11	0,04	0,28	27,69
	NDVI	0,56	0,59	-1,00	1,00	0,65	0,13	0,24	23,71
	Rn _{ins}	579,71	585,77	78,00	712,10	600,63	34,93	0,06	6,03
	Rn _{24h}	16,42	16,63	0,71	19,23	16,85	0,81	0,05	4,92
	ETR _{24h}	2,54	2,66	0,00	6,48	3,04	0,76	0,30	29,96
	RFA	67,78	72,97	0,00	136,34	80,42	20,20	0,30	29,81
	FE	0,38	0,39	0,00	1,00	0,44	0,11	0,28	27,93
	Bio	5,69	5,94	0,00	16,54	8,01	2,46	0,43	43,27

Data: Data da observação da imagem orbital; PB: Parâmetro Biofísico; Med: mediana; Min: mínimo; Máx: máximo; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; NDVI: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; Rn_{inst}: Saldo de radiação instantâneo ($W.m^{-2}$); Rn_{24h}: Saldo de radiação diário ($MJ.m^{-2}$); Etr_{24h}: Evapotranspiração real diária ($mm.dia^{-1}$); RFA: radiação fotossinteticamente Ativa ($W.m^{-2}$); FE: Fração evaporativa; Bio: Biomassa ($g.m^{-2}$).

Por meio da tabela 4 observa-se que os menores valores de coeficiente de variação foram atribuídos ao saldo de radiação diário (Rn_{24h}) com valores de 6,5 e 4,9% para a imagem do dia 6 de julho de 2003 e 10 de junho de 2011, respectivamente. Enquanto que os maiores foram atribuídos à biomassa seca, com valores de 97,7 e 43,3% para a cena do dia 6 de julho de 2003 e 10 de junho de 2011, respectivamente. De acordo com Zwart et al. (2006), valores de CV abaixo de 9% indicam extrema homogeneidade no padrão de distribuição espacial.

Ainda na tabela 4, consta-se o valor do coeficiente de variação para o NDVI de 40% no ano de 2003. De acordo com SILVA et al. (2011) o NDVI pode ser utilizado como um parâmetro indicador da dinâmica espaço temporal de

diferentes ocupações do solo, em virtude da sua elevada sensibilidade de detecção envolver radiação visível e infravermelha em superfície.

O albedo da superfície apresentou coeficiente de variação de 29 e 28% para os dias 06 de julho de 2003 e 10 de junho de 2011, respectivamente. Mostrando uma homogeneidade entre os valores obtidos. Em sistemas ecológicos o albedo controla as condições microclimáticas das culturas e a absorção de radiação, afetando aspectos físicos e fisiológicos, tais como o balanço de energia, evapotranspiração, fotossíntese e respiração (WANG et al., 2001). Esta afirmativa evidencia que a determinação do albedo é um parâmetro importante no estudo de mudanças climáticas e impactos ambientais (SILVA et al., 2005).

Na Figura 9 observam-se as cartas do albedo da superfície (α_{sup}) para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011, onde é possível verificar que os valores mínimos não apresentaram grande variação, enquanto que os valores máximos no dia 10/06/2011 foram inferiores ao apresentado no dia 06/07/2003, devido a maior presença de áreas com solo exposto (área degradada), pastagens e culturas agrícolas, principalmente, a cultura da mandioca (FERNANDES, 2011).

Na imagem do dia 06/07/2003 (figura 9a), é possível verificar que a maior parte da área estudada se encontra com valores de albedo da superfície da ordem de 0,18 e 0,74. Segundo Accioly et al. (2001), a redução da cobertura de plantas perenes aliado a degradação do solo das áreas com menor cobertura vegetal, tendem a aumentar o albedo das superfícies sujeitas à degradação e reduzir a precipitação local, intensificando o processo de desertificação. Silva et al. (2010 b), estudaram o albedo da superfície visando conhecer o grau de degradação em duas áreas (irrigada e vegetação nativa) na região do Sertão do estado de Pernambuco e Charney (1975) estudando a região semiárida no Sahel (Sul da África), por mais de 20 anos, verificou que o aumento do albedo causou uma redução na precipitação. Da análise dos gráficos das figuras 7 e 8, percebe-se que em 2003 a menor precipitação pluviométrica com relação ao ano de 2011 influenciou no aumento do albedo.

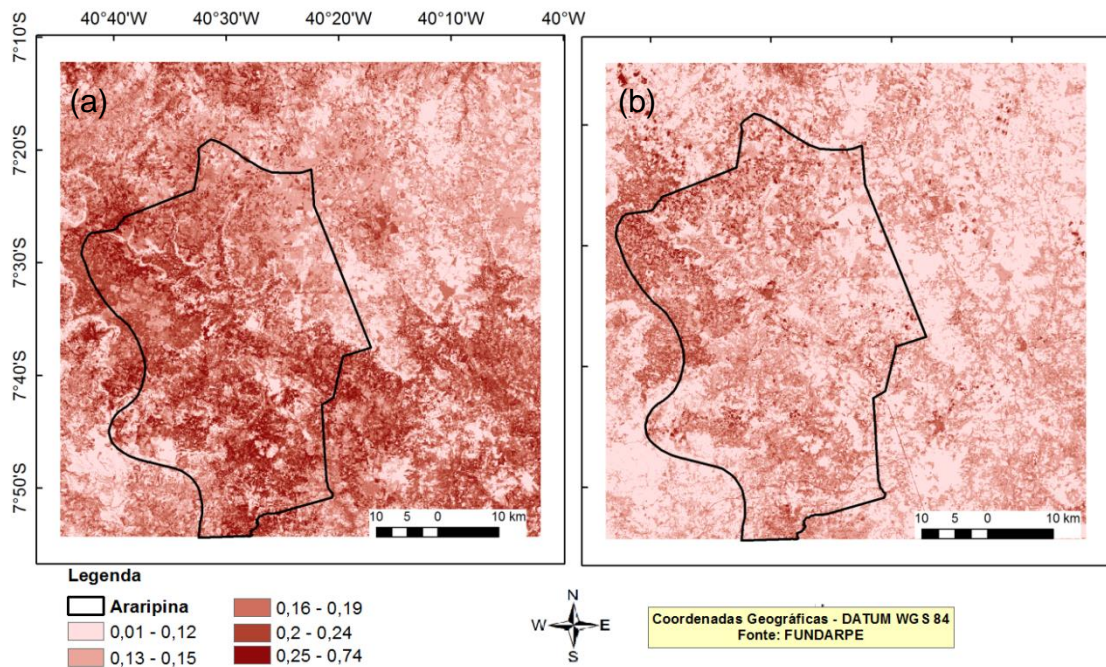


Figura 9. Carta do albedo à superfície (α_{sup}) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

São apresentadas na Figura 10 as cartas do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011, onde nota-se um aumento nos valores de NDVI para a imagem do ano de 2011 em relação à de 2003. Esse aumento justifica-se devido a maior presença de áreas com solo exposto na imagem do dia 06/07/2003 caracterizado pela grande presença de valores entre -1 a 0,21 e pelo maior volume de chuvas nos dias que antecederam a obtenção da imagem (figuras 7 e 8). Valores negativos de NDVI foram encontrados para áreas sobre corpos d'água. Silva (2009), mapeando a evapotranspiração na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe usando técnicas de sensoriamento remoto, verificou que em superfícies com solo descoberto, pequenos aglomerados urbanos, ou mesmo em áreas cobertas por vegetações caducifólias ralas que não se mantêm verde na estação seca, o valor do NDVI aproxima-se de zero.

Observa-se que na Figura 9 e na Figura 10, no dia 06/07/2003, há uma grande semelhança de comportamento entre os padrões de variabilidade espacial, apresentados para os parâmetros biofísicos albedo da superfície e NDVI. Uma vez que a cobertura com estresse hídrico tende a absorver menos radiação solar, o que aumenta sua reflectância na faixa espectral do visível

(albedo elevado) e a absorver mais na faixa espectral do infravermelho o que ocasiona menores valores de NDVI (BEZERRA et al., 2014).

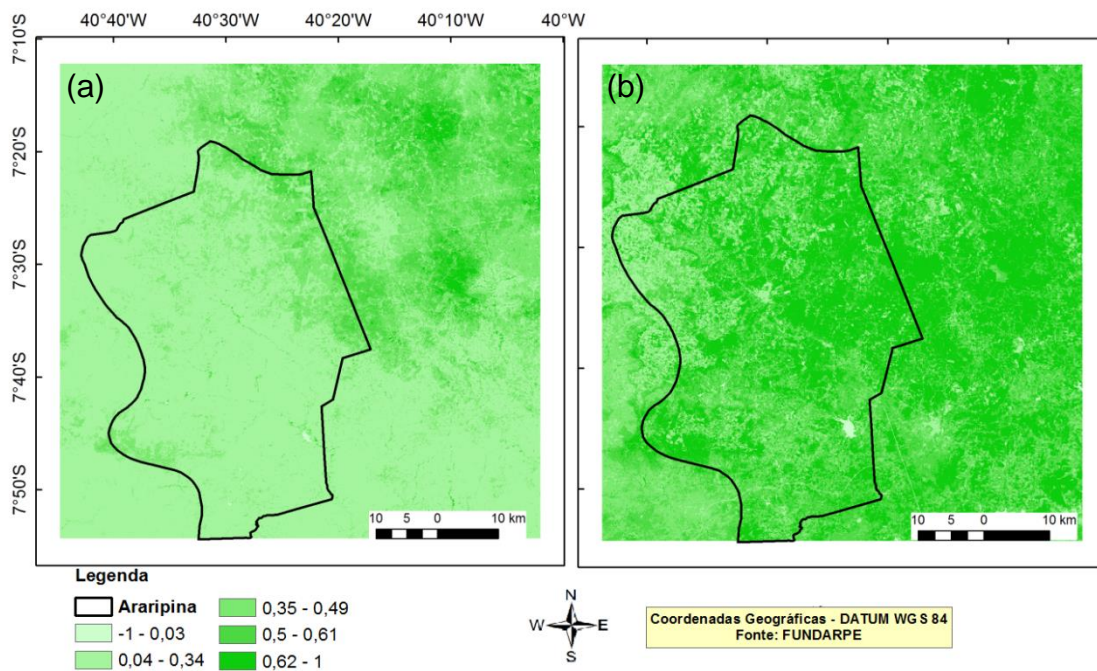


Figura 10. Carta do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Os maiores valores do saldo de radiação solar instantâneo ($R_{n_{ins}}$, $W.m^{-2}$) (Figura 11) no dia 06/07/2003 se encontram na porção Nordeste e Sudoeste da região estudada, apresentando valores entre 537 e 664 $W.m^{-2}$. Enquanto no dia 10/06/2011 os maiores valores de apresentam na região Nordeste, Sul e Sudoeste da área estudada, com valores entre 589 e 695 $W.m^{-2}$. Os valores mais elevados correspondem à presença de vegetação de caatinga de porte baixo, arbustiva. Os maiores valores de $R_{n_{ins}}$ ocorreram na imagem de 2011, possivelmente devido ao albedo ser menor (Figura 9). Bezerra (2013) encontrou valores semelhantes de saldo de radiação solar instantâneo em estudo realizado na área que abrange a Unidade de Conservação (UC) do Parque Nacional da Furna Feia (PNFF) e suas adjacências, localizado no estado do Rio Grande do Norte.

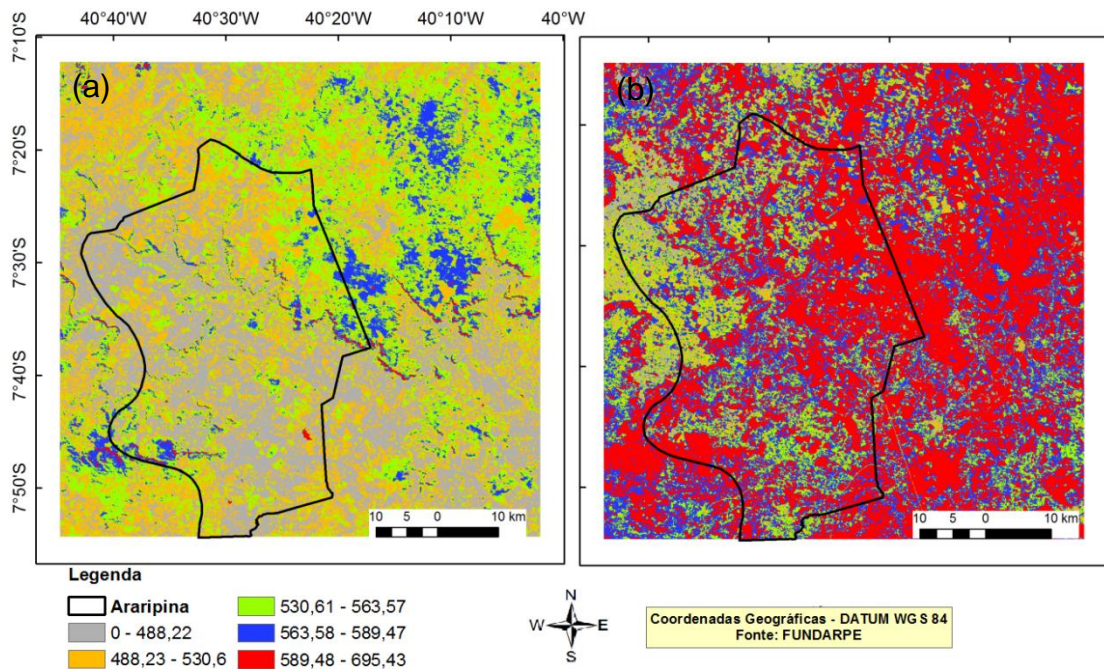


Figura 11. Carta do saldo de radiação solar instantâneo (R_{nins} , $W.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Na Figura 12 observa-se os dados do saldo de radiação solar diário (R_{n24h} , $MJ.m^{-2}$), para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011. No dia 06/07/2003 a maior área da região estudada apresenta valores entre 13 e 15 $MJ.m^{-2}$. Os maiores valores (16 a 19 $MJ.m^{-2}$) são predominantes na imagem do dia 10/06/2011 estando associados ao menor albedo (Figura 9) e maior NDVI (Figura 10). Bezerra (2013) encontrou valores semelhantes em áreas de solo exposto, na Caatinga do Parque Nacional da Furna Feia (PNFF) – Rio Grande do Norte, com valores de saldo de radiação diário na ordem de 14 a 15 $MJ.m^{-2}$ no inverno e na estiagem valores na classe de 12 a 13 $MJ.m^{-2}$ e para a área de vegetação apresentou valores de 18 a 19 $MJ.m^{-2}$ em período de inverno, enquanto na estiagem a mesma obteve valores de 15 $MJ.m^{-2}$. Silva et al. (2011) ao realizar estudos com imagens do ano 2008 do Perímetro Irrigado São Gonçalo, em Sousa – Paraíba, encontrou valores máximo (16,99 $MJ.m^{-2}$ em 19 de dezembro) e mínimo (8,26 $MJ.m^{-2}$ em 14 de setembro) no solo exposto da região.

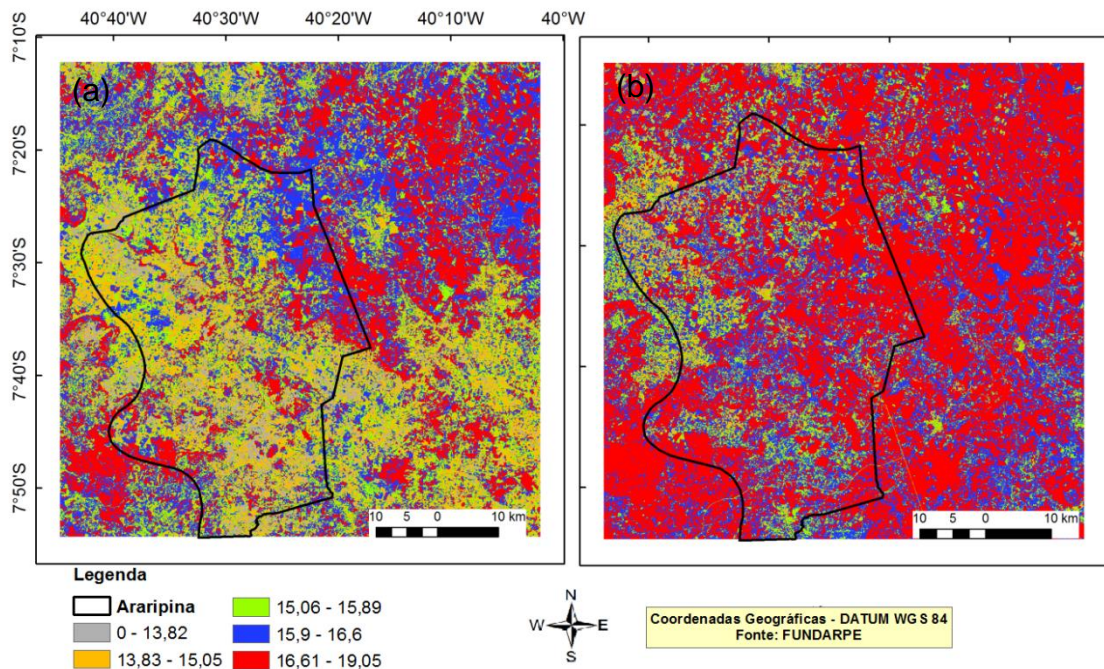


Figura 12. Carta do saldo de radiação solar diário (Rn_{24h} , MJ.m⁻²) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Tem-se na figura 13 as cartas de evapotranspiração real diária (ET_{24h} , mm.dia⁻¹), para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011. Nota-se que a evapotranspiração real diária acompanhou os padrões de NDVI, ou seja, altos valores do índice de vegetação estão associados a altos valores da ET_{24h} . Nas áreas com vegetação degradadas, a baixa ET_{24h} está associada à regiões com baixos valores de NDVI. Na área ocupada pelos corpos d'água, foram obtidos altos valores de evaporação, coincidindo com valores negativos de NDVI.

Na imagem de 2003 (Figura 13a), valores entre (0 e 1,23 mm.dia⁻¹) correspondem a áreas de solo exposto, enquanto a vegetação nativa de Caatinga menos densa e sem folhas obtiveram valores entre 1,24 e 2,11 mm.dia⁻¹. Na imagem de 2011 (figura 13b), há uma menor presença de áreas com solo exposto apresentando valores entre 0 e 1,23 mm.dia⁻¹, já a vegetação de Caatinga mais densa apresentou valores da ordem de 2,7 a 7 mm.dia⁻¹. Nota-se pouca influencia dos eventos de chuva sobre os dados de evapotranspiração, principalmente, devido a distancia entre o ultimo evento de precipitação e as datas de obtenção das imagens em ambos os anos estudados (figura 7).

Segundo Moreira et al. (2010), o algoritmo SEBAL além de estimar a evapotranspiração e os termos do balanço de energia na superfície, permite

detectar a existência de áreas degradadas ou em processo de degradação e áreas com NDVI muito baixo, albedo elevado e baixa evapotranspiração indicam áreas degradadas, de solo exposto ou pouco vegetadas e secas. Giongo (2011), especificamente para áreas de pasto, analisou a evapotranspiração da bacia do Rio Corumbataí (1700 km²), no centro-leste de São Paulo por meio de imagens Landsat TM5 datadas de julho de 2008 a julho de 2010, e constatou valores médios entre 2 e 3 mm.dia⁻¹ para as imagens referentes ao inverno e outono e para área no entorno da estação meteorológica (grama) obteve o valor médio de 2,38 mm.dia⁻¹ para 22 de abril de 2009.

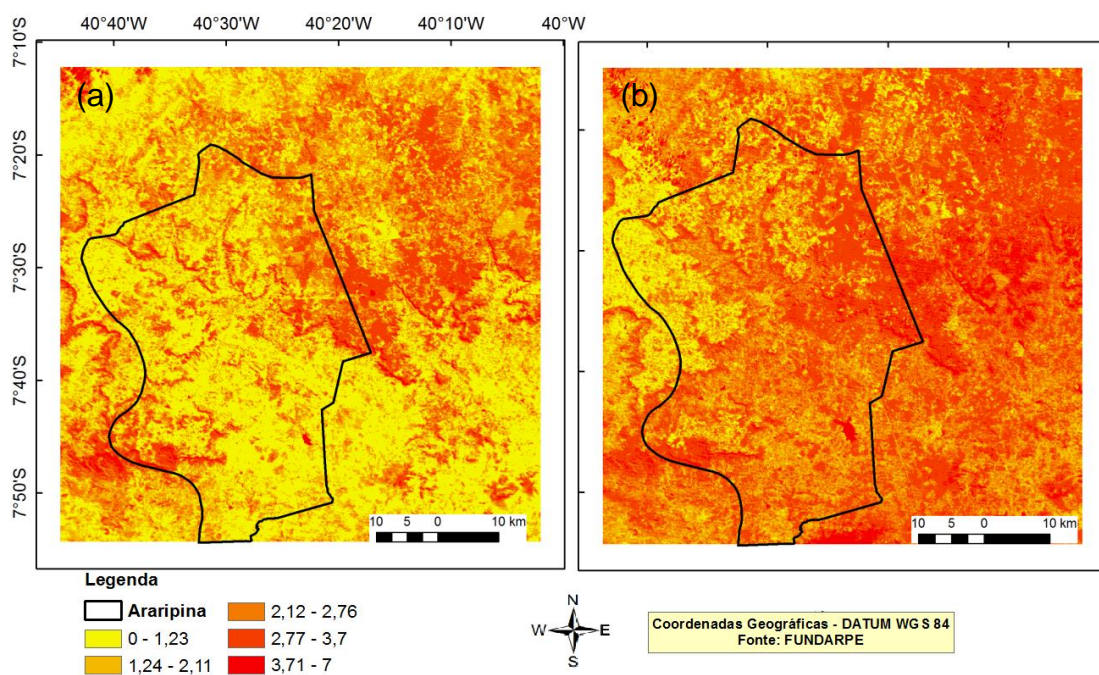


Figura 13. Carta da evapotranspiração diária (ET_{24h} , mm.dia⁻¹) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Na carta da radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($W.m^{-2}$) para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011 (Figura 14), nota-se que na imagem de 2003 praticamente toda a área estudada apresentou valores de RFAA entre 0,0 e 28,34 $W.m^{-2}$, associada a presença de pastagens, vegetação rala de Caatinga, áreas agricultáveis e ao solo exposto. E a imagem de 2011, verifica-se uma redução nas áreas de solo exposto, essas que foram substituídas por áreas de pasto e culturas agrícolas (FERNANDES, 2011), com os menores valores entre 0,0 e 49,74 $W.m^{-2}$ e os maiores entre 66,3 e 136,3 $W.m^{-2}$.

Segundo Oliveira (2008), altos valores de RFAA representaram uma condição de maior atividade da vegetação, independente do tipo. Brandão et al (2007), obtiveram uma RFAA diária na faixa de 4,84 a 121,18 $W.m^{-2}$, na chapada do Araripe e Fontana et al. (2012) concluíram que apesar de maior detalhamento espacial (pixel de 30 m), as imagens Landsat/TM revelam um limitador temporal e que o método aplicado às imagens MODIS possibilita o monitoramento da RFAA.

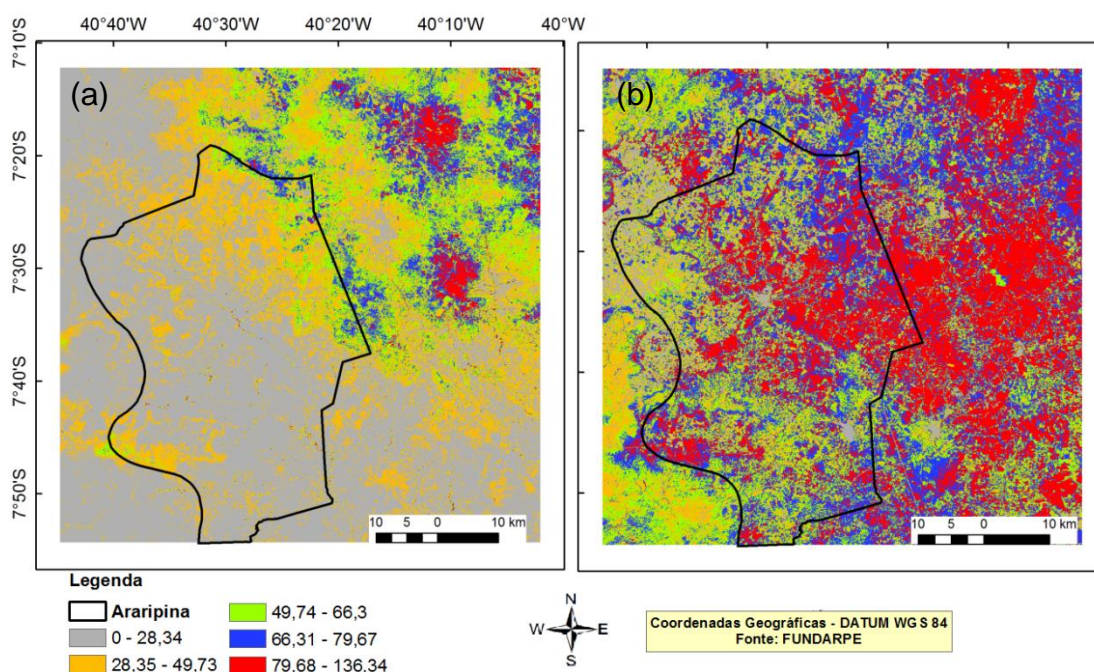


Figura 14. Carta da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA, $W.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

Na figura 15 observam-se as cartas da Biomassa seca (Bio, $g.m^{-2}$) para os dias 06/07/2003 e 10/06/2011, em que na imagem do dia 06/07/2003, a maior parte da área estudada apresentou valores entre 0 (zero) e 2,4 $g.m^{-2}$. Enquanto, na porção nordeste da área, os valores encontrados foram de 4,7 a 8,2 $g.m^{-2}$. Correspondendo aos baixos índices de chuva durante o período da imagem.

Já a imagem do dia 10/06/2011 (Figura 15 b) apresentou valores entre 0 e 2,4 $g.m^{-2}$. No entanto, neste dia a área estudada apresentou em sua maior extensão, valores de Biomassa seca entre 4,7 a 17 $g.m^{-2}$. Um aumento subsidiado pela precipitação ocorrida nos últimos dois meses na região (Figura

8), uma vez que esta exerce importante papel na distribuição das espécies e produção de biomassa.

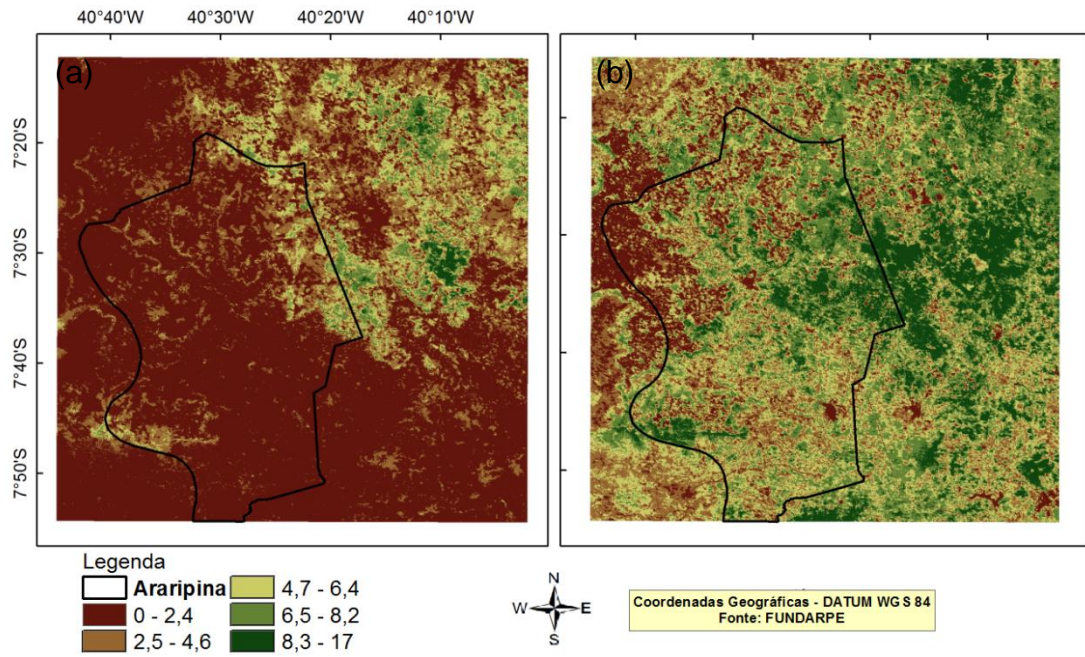


Figura 15. Carta da Biomassa seca (Bio, $g.m^{-2}$) no município de Araripina, PE nos dias (a) 06/07/2003 e (b) 10/06/2011.

5. CONCLUSÕES

1. A análise comparativa dos parâmetros biofísicos das imagens TM-Landsat associados com os dados de precipitação pluviométrica, mostrou um aumento nos valores de NDVI e RFA com médias de 0,32 e 32,71 W m⁻² para 2003 e 0,56 e 67,78 W m⁻² para o ano de 2011.
2. A evapotranspiração real diária acompanhou os padrões de NDVI, apresentando aumento na comparação entre os anos estudados e em 2003 apresentou valores entre 0 e 2,11 mm.dia⁻¹. Enquanto que em 2011 os valores estão entre 0 e 7 mm.dia⁻¹.
3. Apesar dos recursos florestais estarem sendo reduzidos para ceder lugar a atividades agropecuárias e como matriz energética, sobretudo, para atividade de mineração, a análise comparativa dos dados de biomassa seca obtidos a partir da análise espacial das imagens apresentou aumento nos valores observados, devido à substituição das áreas antes com solo exposto por pastagem e áreas cultivadas, e aos eventos de chuva ocorridos no ano de 2011. Com médias de 2,08 e 5,69 g.m⁻² para 2003 e 2011 respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; SILVA, F. H. B. B.; BURGOS, N. Avaliação de Mudanças no Albedo do Núcleo de Desertificação do Seridó através de Imagens do Landsat TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** INPE, 2001.

ALADOS, I., PÉREZ, M, OLMO, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. On the use of parametric models for the estimation of photosynthetically active radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**. 1999.

ALADOS, I., OLMO, F.J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p.39-50. 2000.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)** – Advanced training and user’s Manual. Version 1.0. Idaho, p.97, 2002.

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

AMIRI, R.; WENG, Q.; ALIMOHAMMADI, A.; ALAVIPANAH, S. K. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.2606-2617, 2009.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimation absorbed photosynthetic radiation and leaf area foliar from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v.76, n.2, p.300-3006, 1984.

ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; SOUZA, W. M. Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas

do Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.03, 2012.

BARICHELO, L. R. **Quantificação da biomassa e dos nutrientes em floresta de Acacia mearnsii De Wild. na região sul do Brasil** – Santa Maria - RS 2003.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229. p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M., ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 213-229, 1998.

BEZERRA, J. M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de caatinga utilizando SEBAL**. Recife, 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G.B.A.; SILVA, B.B.; LOPES, P. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.1, p.73–84, 2014.

BRADFORD, J.B., HICKE, J.A., E LAUENROTH, W. K., The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. **Remote Sens. of Environment**, v.96, pg. 246 - 255, 2005.

BRANDÃO, Z.N.; BEZERRA, M.V.C.; SILVA, B. B. Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p.75-81.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, DOS RECURSOS HÍDRICOS E DA AMAZÔNIA LEGAL (MMA). **Convenção das Nações Unidas de combate a desertificação: Nos países afetados por seca grave e/ou desertificação, particularmente na África.** 2. ed. Brasília, DF: MMA: Plano Nacional de Combate a Desertificação, 95 p. 1998.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere.** D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holland. 300 p. 1982.

BURGER, D.M.; DELITTI, W.B.C. Fitomassa epigéia da mata ciliar do rio Mogi-Guaçu, Itapira – SP. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 429-435, 1999.

CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; CAMPAGNOLO, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E. Assessing the extent of agriculture/ pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using Spot Vegetation data. **Remote Sensing of Environment**, v.101, p.283-298, 2006.

CAVALCANTI, R. C.; ARAÚJO, N. C. F. DE. **O uso de energia de biomassa no Bioma Caatinga.** Semana do meio ambiente. Recife: Fundação Joaquim Nabuco. Recife. 2008.

CPTEC - **CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS**, 2014. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 26 de março de 2014.

CHARNEY, J. G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, n.101, p. 193-202. 1975.

CONRAD, C., DECH, S. W., HAFEEZ, M., LAMERS, J., MARTIUS, C., STRUNZ, G. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 21, p. 197-218, 2007.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, B. B.; CHAVES, I. B. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.539-548, 2012.

ENGESAT- IMAGENS DE SATÉLITES. **Sensor TM** , 2013. Disponível em:
<<http://www2.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=528>>

Acesso em: 27 de outubro de 2013.

FERNANDES, M. F.; BARBOSA, M. P.; NETO, J. M. de M. Análise das classes de uso das terras no município de Araripina - PE: um estudo comparativo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** INPE, 2013. p. 514-521.

FERNANDES, M. DE F. **Degradação ambiental e vulnerabilidades nos municípios de Araripina (PE), Crato e Barbalha (CE) e Marcolândia (PI) - Chapada do Araripe: um estudo comparativo**. Campina Grande, 2011, 238f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba.

FIELD, C. B., RANDERSON, J. R., MALMSTRÖM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélites para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002.

FONTANA, D.C.; ALVES, G. M.; ROBERTI, D.; MORAES, O. L. L.; GERHARDT, A. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. **Revista Bragantia**, v. 71, n. 4, p.563-571, 2012.

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. Piracicaba: ESALQ-USP, 2003, 131p., Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

FUNDAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE PERNAMBUCO (FUNDARPE). **Shapefiles**. Disponível em: <<http://www.mapacultural.pe.gov.br/inicial/shapefile.htm>> Acesso em 15 de maio de 2013.

GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. Recife. 2008, 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) UFRPE.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. ESALQ. Piracicaba, 2011, 126 f. Tese (Doutorado em Ciências).

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

HAAG, H. P. **A nutrição mineral e o ecossistema**. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.49-52, 1987.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ –

Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, p. 125-145. 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomass**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em 10 de maio de 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Divisão de Geração de Imagens (DGI)**, 2013. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em 16 de junho de 2013.

LARCHER, W. 2000. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos, ed. Rima. São Paulo. 529p.

LEAL, I.R.; SILVA, J.M.da; TABARELLI, M.; LACHER JR, T.E. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, v.1, n.1, p. 139-146. 2005.

MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 71, p. 149-154, 2006.

MELO, J. B. **Caracterização biométrica do remanescente da raça eqüina Nordestina nos estados de Pernambuco e Piauí**. Tese (Doutorado em Zootecnia)/ Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2011, 118f.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) E INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Monitoramento do Desmatamento nos Biomass Brasileiros por Satélite**. Centro de Sensoriamento Remoto – CSR/IBAMA BRASÍLIA, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) / SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. **Diagnóstico do Município de Araripina**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, 747-766. 1972.

MORAIS, E. C., **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, SP: DSR/INPE, 2002.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 250p. 2001.

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

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.6, p.1148-1159, 2010.

MYNENI, R.; WILLIAMS, D. On the relationships between FAPAR and IVDN. **Remote Sensing of Environment**, v.49, p.200- 211, 1994.

OLIVEIRA, L. M. T. **Estudo das regiões fitoecológicas brasileiras pela FAPAR/NDVI e relações com séries temporais de dados pluviométricos**. Rio de Janeiro, 226f. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil.) - Programa De Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

PAULSON, C.A. The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. **Journal of Applied Meteorology**, v.9, p.856-861, 1970.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco**. Simone Rosa da Silva (Org.), Recife: Ed. A secretaria. 2006.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. UNB. Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. Capítulo 5. p. 157–199.

SÁ, I. I. S.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; SÁ, I. B. Avaliação da Degradação Ambiental na Região do Araripe Pernambucano Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2011.

SAMPAIO, E.V.S.B. **Caracterização da caatinga e fatores ambientais que afetam a ecologia das plantas lenhosas**. p. 129-142. In: V.C. Sales (ed.). *Ecosistemas brasileiros: manejo e conservação*. Fortaleza, Expressão Gráfica e Editora. 2003.

SANQUETA, C. R. **Métodos de determinação de biomassa florestal**. In: Sanqueta, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A.; Gomes, F. S. *As florestas e o carbono*. UFPR, Curitiba, 2002. Capítulo 6. p. 119 - 140.

SANTOS, J.R. **Biomassa aérea da vegetação de cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat**. 1988. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

SANTOS, C.M.A. **Estatística Descritiva** - Manual de Auto-aprendizagem, Lisboa, Edições Sílabo, 261p., 2007.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Revista Ceres**, 2009.

SILVA, S. T. A. **Mapeamento da evapotranspiração na bacia hidrográfica do baixo Jaguaribe usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2009, 119f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - LANDSAT 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 14, p. 1-10, 2006.

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. V. **Biodiversidade da Caatinga: Áreas e ações prioritárias para a conservação**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2002.

SILVA, J.M.C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L.V. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2003.

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

SILVA, 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, B.B.; SILVA, S.T.A.; GOMES, H.B. Alterações Climáticas Decorrentes de Mudanças no Uso da Terra Mediante Sensoriamento Remoto. **Mercator**, volume 9, número especial (1), 2010 a.

SILVA, A. P. N.; MOURA, G. B. A.; GIONGO, P. R.; SILVA, B. B. Albedo de Superfície Estimado A Partir De Imagens Landsat 5 – Tm No Semiárido Brasileiro. **Revista de Geografia**. v. 27, n. 1, jan/mar. 2010 b.

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

SILVA, B. B. ; GALVÍNCIO, J. ; BORGES, V. P. ; MACHADO, C.C.C. **Estimativa do Sequestro de Carbono por Sensoriamento Remoto**. In: Josiclêda Domiciano Galvíncio. (Org.). *Mudanças Climáticas e Modelos Ambientais: Caracterização e Aplicações*. Recife: Editora Universitária UFPE, p. 51-70, 2012.

STANHILL, G.; FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically active radiation. **Journal of Applied Ecology**, p. 317-322, 1977.

TABARELLI, M. F.; VICENT, A. **Conhecimentos sobre plantas lenhosas da Caatinga: lacunas geográficas e ecológicas**, p. 101-112 In: *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias*. MMA, Brasília, DF. 2003.

TEIXEIRA, A. H. de C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3-4, p. 477-490, 2009.

UDA, P. K. E. **Avaliação da evapotranspiração real da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL**. Florianópolis, 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

WANG, S.; GRANT, R. F.; VERSEGHY, D. L.; BLACK, T. A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS - the Canadian Land Surface Scheme. **Ecology Modelling**, v.142, p.135-154, 2001.

WEBB, E.K. Profile Relationships: the Log-linear Range and Extension to Strong Stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.96, p.67-90, 1970.

ZWART, S.J.; BASTIAANSEN, W.G.M.; GARATUZA-PAYAN, J.; WATTS, C.J. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity for wheat in the Yaqui Valley, Mexico. Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management, **American Institute of Physics**, p. 154-161. 2006.