UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

JOÃO ALVINO SAMPAIO DA SILVA

DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA VEGETAL E PARÂMETROS AMBIENTAIS ASSOCIADOS NA CHAPADA DO ARARIPE POR IMAGEM DE SATELITE

CAMPINA GRANDE – PB
2013

JOÃO ALVINO SAMPAIO DA SILVA

DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA VEGETAL E PARÂMETROS AMBIENTAIS ASSOCIADOS NA CHAPADA DO ARARIPE POR IMAGEM DE SATELITE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Campina Grande – PB

2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586d Silva, João Alvino Sampaio da.

Determinação da biomassa vegetal e parâmetros ambientais associados na chapada do Araripe por imagem de satélite / João Alvino Sampaio da Silva. – Campina Grande, 2013.

91 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos".

Referências.

1. Landsat 5 (Satélite). 2. Floresta Nacional do Araripe. 3. NDVI. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Título.

CDU 551.507:629.783(043)

JOÃO ALVINO SAMPAIO DA SILVA

DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA VEGETAL E PARÂMETROS AMBIENTAIS ASSOCIADOS NA CHAPADA DO ARARIPE POR IMAGEM DE SATÉLITE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/10/2013

BANCA EXAMINADORA

Carlos A. C. dos Santos.

Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

José Ivaldo B. Brito

Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. FRANCISCO BORJA RUIZ REVERTER
Centro de Ciências Agrárias
Universidade Federal da Paraíba

À Deus pelo dom da vida,
Aos meus pais Maria do Socorro e Francisco José,
À minha Irmã e meu cunhado Idalina e Rogerio,
À meus sobrinhos Felipe e Henrique,
À meus avós maternos, José Antônio Sampaio (*in memoriam*) e Anizia Macedo Sampaio (*in memoriam*).

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque mesmo que pessoas conspirem contra mim. Deus estará comigo.

A minha família pelo apoio e incentivo, meu pai Francisco José da Silva minha mãe Maria do Socorro Sampaio da Silva, minha irmã Idalina e cunhado Rogerio Feitosa, meus sobrinhos Felipe e Henrique, que sempre deram seu amor.

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, através do Departamento de Ciências Atmosféricas, pela forma calorosa de acolhimento e condução educacional.

Aos professores:

- ✓ Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos: pela sua orientação e principalmente compreensão;
- ✓ Prof. Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito: por transmitir sabedoria, confiança e amizade a todos os seus alunos;
- ✓ Prof. Dr. Célia Campos Braga: por conduzir os primeiros passos desta longa caminhada;
- ✓ Prof. Dr. Enio Pereira de Souza: pela dedicação ao bom ensino e convívio em sua disciplina.

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Meteorologia.

Ao Instituto Centro de Ensino Tecnológico (CENTEC), através da FATEC Cariri, pela formação acadêmica.

Aos professores:

- ✓ Prof. MSC. Raimundo de Sá Barreto Grangeiro: por ter me incentivado e acompanhado durante minha vida acadêmica;
- ✓ Prof. Dr. Manuel Antonio Navarro Vásquez: por ter me indicado à primeira oportunidade de pesquisa (graduação);
- ✓ Prof. Dr. Ediuza Maria Felipe Vásquez: por ter me orientado em vários trabalhos enriquecendo o meu conhecimento.

Ao 3° Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na pessoa de Raimundo Jaildo dos Anjos e Bernadete Lira dos Anjos pelo apoio que me deram.

Aos amigos e colegas do Centro Vocacional Tecnológico do Ceará (CVTEC-Barbalha).

Ao amigo Raimundo Mainar Medeiros que muito me ajudou a crescer academicamente e pessoalmente.

A secretaria do Departamento de Ciências Atmosféricas Divanete Cruz Rocha Farias, pelo seu apoio e principalmente sua amizade.

Ao amigo José Antônio do Nascimento por sua amizade e compreensão.

Ao amigo Rickson Tavares Bezerra por sua companhia durante varias viagens ao mestrado.

Aos amigos Adnan Araújo, Ramon Araújo e Tarcisio pela companhia e apoio que me deram.

Quem mora lá no pé da serra, vive numa terra, que a tristeza não passou e seja noite, ou seja, dia se vê alegria em todo morador.

(Luiz Gonzaga)

Sumário

LISTA DE FIGURAS I

LISTA DE TABELAS IV

LISTA DE SÍMBOLOS VI

RESUMO VIII

ABSTRACT IIX

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 3

2.1 OBJETIVO GERAL: 3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

3.1 DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E DESMATAMENTO 4
3.2 CHAPADA DO ARARIPE E FLORESTA NACIONAL DO ARARIPE 6
3.3 SENSORIAMENTO REMOTO 8
3.4 BIOMASSA ACUMULADA 11
3.5 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. 12
3.6 ALGORITMO SEBAL 13
3.7 ALGORITMO CASA 15

4. MATERIAL E MÉTODOS 16

4.1 REGIÃO DE ESTUDO 16
4.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE: 17

4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS 17
4.4 ALGORITMOS UTILIZADOS 17
4.5 CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA 19
4.6 REFLECTÂNCIA MONOCROMÁTICA (ρ_λ) 19
4.7 ALBEDO PLANETÁRIO 21
4.8 ALBEDO DA SUPERFÍCIE 21
4.9 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO 22
4.10 EMISSIVIDADES 23
4.11 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE 23
4.12 RADIAÇÃO DE ONDA LONGA EMITIDA 24
4.13 RADIAÇÃO DE ONDA LONGA INCIDENTE 24
4.14 RADIAÇÃO DE ONDA CURTA INCIDENTE 24
4.15 SALDO DE RADIAÇÃO (RN) 25
4.16 FLUXO DE CALOR NO SOLO (G) 25
4.17 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL (H) 25
4.18 FLUXO DE CALOR LATENTE (LE) 33
4.19 FRAÇÃO EVAPORATIVA INSTANTÂNEA (Λ) 33
4.20 RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (PAR) 33
4.21 PORÇÃO ABSORVIDA DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA (APAR) 34
4.22 BIOMASSA ACUMULADA 34

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 36

5.1 ELEMENTOS CONSTITUINTES DAS CENAS ESTUDADAS 36
5.2 SALDO DE RADIAÇÃO (RN) 37
5.3 FLUXO DE CALOR SOLO (G) 42
5.4 FLUXO DE CALOR SENSÍVEL (H) 48
5.5 FLUXO DE CALOR LATENTE (LE) 58
5.6 FRAÇÃO EVAPORATIVA (Λ) 63
5.7 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) 69
5.8 BIOMASSA ACUMULADA (BIO_ACUM) 74

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES. 81

6.1 CONCLUSÕES 81

6.2 SUGESTÕES 81

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fotografia de desflorestamento de uma área na Chapada do Araripe. 5

Figura 3.2 - Fotografia do lado norte da Chapada do Araripe. 7

Figura 3.3a - Espectro eletromagnético com destaque colorido para região do visível. 9

Figura 3.3b - Esquema do funcionamento do sensoriamento remoto. 10

Figura 4.1 - Mapa do Brasil, com destaque para a Chapada do Araripe. 16

Figura 4.2 - Fluxograma das etapas computacionais e combinação entre os algoritmos SEBAL e CASA para obtenção da biomassa acumulada. 18

Figura 4.3 - Fluxograma das etapas para obtenção do fluxo de calor sensível. 28

Figura 5.1– Cena estudada em composição RGB para as bandas 4, 3 e 2 Landsat 5-TM. 36

Figura 5.2 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 30/07/2006. 39

Figura 5.3 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 18/08/2007. 39

Figura 5.4 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 21/09/2008. 40

Figura 5.5 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 24/09/2009. 40

Figura 5.6 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 13/10/2010. 41

Figura 5.7 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 29/08/2011. 41

Figura 5.8 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 30/07/2006. 45

Figura 5.9 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 18/08/2007. 46

Figura 5.10 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 21/09/2008. 46

Figura 5.11 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 24/09/2009. 47

Figura 5.12 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 13/10/2010. 47

Figura 5.13 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 29/08/2011. 48

Figura 5.14 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 30/07/2006. 55

Figura 5.15 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 18/08/2007. 55

Figura 5.16 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 21/09/2008. 56

Figura 5.17 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 24/09/2009. 56

Figura 5.18 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 13/10/2010. 57

Figura 5.19 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 29/08/2011. 57

Figura 5.20 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 30/07/2006. 60

Figura 5.21 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 18/08/2007. 61

Figura 5.22 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 21/09/2008. 61

Figura 5.23 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 20/09/2009. 62

Figura 5.24 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 13/10/2010. 62

Figura 5.25 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 29/08/2011. 63

Figura 5.26 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 30/07/2006. 66

Figura 5.27 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 18/08/2007. 66

Figura 5.28 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 21/09/2008. 67

Figura 5.29 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 24/09/2009. 67

Figura 5.30 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 13/10/2010. 68

Figura 5.31 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 29/08/2011. 68

Figura 5.32 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 30/07/2006. 71

Figura 5.33 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 18/08/2007. 72

Figura 5.34 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 21/09/2008. 72

Figura 5.35 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 24/09/2009. 73

Figura 5.36 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 13/10/2010. 73

Figura 5.37 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 29/08/2011. 74

Figura 5.38 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 30/07/2006. 78

Figura 5.39 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 18/08/2007. 78

Figura 5.40 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 21/09/2008. 79

Figura 5.41 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 24/09/2009. 79

Figura 5.42 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 13/10/2010. 80

Figura 5.43 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 29/08/2011. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Constantes de calibração espectral para o Landsat 5 – TM (proposta para datas > que 04/05/2003). 19

Tabela 4.2– Valores de $ESUN_\lambda$ em W $m^{-2}\mu m^{-1}$ validos para o Landsat5. 20

Tabela 4.3 – Datas das imagens e seus respectivos valores de *DJ*, d_r e cos θ. 20

Tabela 4.4 – Coeficiente de regressão linear para cada banda espectral para imagem TM Landsat5. 21

Tabela 4.5 – Velocidade do vento para o momento da passagem do satélite e suas respectivas datas. 27

Tabela 5.1 – Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de floresta nativa densa. 37

Tabela 5.2 Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de floresta nativa rala. 38

Tabela 5.3 – Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de solo nu. 38

Tabela 5.4 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de floresta nativa densa. 44

Tabela 5.5 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de floresta nativa rala. 44

Tabela 5.6 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de solo nu. 45

Tabela 5.7 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 30/07/2006. 49

Tabela 5.8 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 18/08/2007. 50

Tabela 5.9 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 21/09/2008. 50

Tabela 5.10 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 24/09/2009. 51

Tabela 5.11 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 13/10/2010. 51

Tabela 5.12 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 29/08/2011. 52

Tabela 5.13 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com vegetação nativa densa. 53
Tabela 5.14 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com vegetação nativa rala. 54
Tabela 5.15 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com solo nu. 54
Tabela 5.16 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de floresta nativa densa. 59
Tabela 5.17 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de floresta nativa rala. 59
Tabela 5.18 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de solo nu. 60
Tabela 5.19 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de floresta nativa densa. 64
Tabela 5.20 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de floresta nativa rala. 64
Tabela 5.21 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de solo nu. 65
Tabela 5.22 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de floresta nativa densa. 69
Tabela 5.23 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de floresta nativa rala. 70
Tabela 5.24 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de solo nu. 70
Tabela 5.25 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de floresta nativa densa em kg m^{-2}. 76
Tabela 5.26 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de floresta nativa rala em kg m^{-2}. 76
Tabela 5.27 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de floresta nativa rala em kg m^{-2}. 77

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
L_λ	Radiação espectral para a banda	$W.m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m$
DN	Numero Digital	Bit
ρ_λ	Reflectância Monocromática	-
ESUN	Constante solar monocromática	-
Θ	Ângulo zenital do Sol	°
d_r	Inverso do quadrado da distancia relativa Terra-Sol	-
DOA	Dia de ordem do ano	-
α_{top}	Albedo no topo da atmosfera	-
ϖ_λ	Coeficiente de regressão linear	-
A	Albedo de superfície	-
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica	-
Z	Altitude local	M
L	Comprimento de Monin-Obukhov	M
ε_{NB}	Emissividade infravermelha da superfície	-
ε_0	Emissividade da superfície	-
T_S	Temperatura da superfície	K
K	Constante de Von Karman	-
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície	$W.m^{-2}$
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície	$W.m^{-2}$
ε_a	Emissividade atmosférica	-

$R_{S\downarrow}$	Radiação de onda curta incidente	$W.m^{-2}$
G_{SC}	Constante solar	-
R_n	Saldo de radiação	$W.m^{-2}$
Σ	Constante de Stefan-Boltzman	$W.m^{-2}\ K^{-4}$
Ta	Temperatura do ar próximo a superfície	K
R	Distancia Terra-Sol	M
r_0	Distância média Terra-Sol	M
Λ	Calor latente de vaporização	$J.Kg^{-1}$
LE	Fluxo de calor latente	$W.m^{-2}$
P	Densidade do ar úmido	$Kg\ m^{-3}$
ρ_λ	Reflectividade da banda (λ)	-
U	Velocidade do vento	$m\ s^{-1}$
L	Calor latente de vaporização da água	$J.Kg^{-1}$
ψ_h	Correção de estabilidade para transporte de calor	-
ψ_m	Correção de estabilidade para o transporte de momentum	-
r_{ah}	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	$s\ m^{-1}$
Cp	Calor especifico do ar a pressão constante	$J.Kg^{-1}$
H	Fluxo de calor sensível	$W.\ m^{-2}$
H	Altura da vegetação	M
G	Fluxo de calor no solo	$W.m^{-2}$

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar e avaliar o comportamento anual do acúmulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe, a partir de dados do satélite Landsat 5-TM, com a combinação dos algoritmos SEBAL e CASA. Para a realização deste estudo foram obtidas 6 imagens, na órbita 217/ponto 65, nas datas de 30/07/2006, 18/08/2007, 21/09/2008, 24/09/2009, 13/10/2010, 29/08/2011 a que correspondem aos DJ de 211, 230, 264, 267, 286, 241, respectivamente. Avaliando a biomassa vegetal acumulada (*Bio_Acum*), obteve-se valores médios para a área de estudo iguais a 453,07 kg m^{-2}, 486,50 kg m^{-2}, 457,23 kg m^{-2}, 571,82 kg m^{-2}, 178,16 kg m^{-2} e 279,09 kg m^{-2}, respectivamente para as referidas datas. Os elevados valores para a *Bio_Acum* na Chapada do Araripe, se deve ao fato de que a área com cobertura de árvores é responsável por aproximadamente 70% da biomassa estimada, onde o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é superior a 0,65.

PALAVRAS-CHAVE: Landsat 5, Floresta Nacional do Araripe, NDVI

ABSTRACT

The objective of this study was to determine and evaluate the annual performance of the accumulation of plant biomass in the Araripe, data from Landsat-5 TM, with the combination of algorithms SEBAL and CASA. For this study 6 images were obtained, in orbit 217/65 point, on the dates of 30/07/2006, 18/08/2007, 21/09/2008, 24/09/2009, 13/10/2010, 29/08/2011 corresponding to the DJ 211, 230, 264, 267, 286, 241, respectively. Evaluating plant biomass accumulated (*Bio_Acum*) gave average values for the area equal to 453.07 kg m^{-2} 486.50 kg m^{-2} study, 457.23 kg m^{-2} 571.82 kg m^{-2}, 178.16 kg m^{-2} and 279.09 kg m^{-2}, respectively, for these dates. The high values for the *Bio_Acum* Araripe, is due to the fact that the coverage area of trees is responsible for approximately 70% of the estimated biomass, where the vegetation index (NDVI) is greater than 0.65.

KEYWORDS: Landsat 5, Araripe National Forest, NDVI

1. INTRODUÇÃO

Como consequência direta da intensificação da exploração agrícola e agropecuária, a dramática deterioração ambiental tem sido observada, contribuindo, para os processos erosivos, extensa degradação dos solos, escassez dos recursos hídricos e perda da biodiversidade, contribuindo diretamente para as mudanças climáticas do planeta.

Conforme Sampaio (2010), em toda Chapada do Araripe, a estrutura vegetal surge como resposta à disponibilidade hídrica, em função do efeito orográfico, visto que a área se localiza a uma altitude de aproximadamente 1000 m, o que a caracteriza como um brejo de altitude com clima sub-umido seco, diferindo do clima semiárido e seco do sertão nordestino no qual a Chapada está inserida. As ações antrópicas de exploração, principalmente para mineração de gesso nas proximidades do município de Araripina PE, contribuem para a substituição da cobertura natural, por um mosaico de áreas em diversos estágios de degradação e regeneração.

Diante do desgaste de diversas áreas na Chapada do Araripe, a utilização das técnicas de sensoriamento remoto constitui importante ferramenta, capaz de fornecer informações precisas e indispensáveis na elaboração de programas de preservação dos recursos hídricos e florestais. Segundo Bastiaanssen et al., (1998) e Bezerra (2006), a possibilidade de obtenção dos dados em escala regional e com diferentes características quanto ao tipo da cobertura, vegetação e fração de exposição do solo, utilizando sensores orbitais remotos, apresenta-se como uma grande vantagem. Os mesmos autores acrescentam que, informações de emitância, reflectância espectral e radiação da superfície terrestre, em micro e macro escala, também podem ser obtidas por meio de imagens de satélite.

A utilização das técnicas de sensoriamento remoto possibilita o monitoramento da evolução espacial e temporal da superfície, visto que, as imagens de satélite fornecem dados que representam a interação entre a radiação eletromagnética e o alvo presente na superfície terrestre. Com o processamento dessas imagens é possível identificar e extrair informações contidas, que representam a situação real de campo, importante para o monitoramento e classificação da área de estudo.

A compreensão da variação do acumulo de biomassa acima do solo é de grande importância para agricultura como também para ecologia, sendo utilizada na determinação da

produtividade agrícola, avaliação da necessidade hídrica das culturas como também na determinação da quantidade de carbono retida pela vegetação.

Há uma forte tendência para as pesquisas com métodos de determinação de biomassa de baixo custo e que não agridam o meio ambiente. O modelo proposto por Monteith (1972) apresenta grande potencial de aplicação em conjunto com os dados de satélite, desde que seja realizado o cálculo da fração evaporativa diária bem como a estimativa da eficiência do uso da luz, importantes para que haja a conversão da atividade fotossintética na quantidade de biomassa acumulada (BRANDÃO et al., 2007).

Tomando como base as informações disponibilizadas por Brandão et al. (2007) a presente pesquisa tem como objetivo determinar e avaliar o comportamento anual do acúmulo de biomassa na Chapada do Araripe, aplicando técnicas de sensoriamento remoto à imagens TM Landsat 5.

Para a concretização deste objetivo, foi utilizado o modelo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), proposto para vegetação verde por Monteith (1972), e o modelo da eficiência da luz, proposto por Field (1995). Na determinação do balanço de energia bem como na determinação da fração evaporativa, foi utilizado o SEBAL *(Surface Energy Balance algorithm for Land)* Bastiaanssen (1995), que tem sua importância e aplicação em estudos de fluxo de calor e estimativa de evapotranspiração, baseado no balanço do fluxo de energia da superfície, proporcional ao saldo de radiação, que por sua vez, equivale a diferença da radiação de ondas curtas que incidem e refletem na superfície terrestre e da radiação de ondas longas, emitida pela superfície, resultando na energia disponível aos processos de evapotranspiração. Combinado ao algoritmo CASA *(Carnegie Ames Stanford Approach)* (POTTER et al., 1993) que é um modelo processual de biosfera terrestre e correntemente aplicado a escalas globais, baseado em dados meteorológicos e provenientes de detecção remota para variáveis biofísicas da vegetação. Sua utilização tem envolvido a avaliação de tendências de produtividade e análise de padrões e ciclos intra-anuais no comportamento da vegetação (CARVALHAIS et al., 2004), finalizando a determinação da biomassa acumulada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Determinar e avaliar o comportamento anual do acúmulo de biomassa na Chapada do Araripe utilizando, uma série de 6 imagens TM Landsat 5, no período seco dos anos de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011 através da combinação entre os algoritmos SEBAL (Surface Energy Balance Algoritm for Land) e CASA (Carnegie Ames Stanford Approach).

2.2 Objetivos Específicos:

- Estimar a eficiência do uso da luz;
- Determinar e avaliar o comportamento espacial e temporal do saldo de radiação;
- Estimar os fluxos de calor no solo, calor sensível e calor latente;
- Calcular a fração evaporativa;
- Obter a distribuição espaço-temporal do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

3. FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Degradação Ambiental e Desmatamento

A intensificação da exploração agropecuária tem se tornado, ao longo dos anos um dos fatores expressivos que contribuem com a degradação ambiental. Evidenciam-se os desflorestamentos massivos, a fragmentação de ecossistemas, a vertiginosa perda da biodiversidade, os severos processos erosivos, escassez dos recursos hídricos e a extensa degradação dos solos, como alguns dos processos extensamente relatados na literatura. (VITOUSEK et al., 1997).

Conceitualmente, a degradação ambiental se caracteriza como qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais, ou como uma alteração adversa da qualidade ambiental, correspondendo ao impacto ambiental negativo (SÁNCHEZ, 2008). A aceleração do processo de degradação depende da fragilidade natural do ambiente, das características climáticas e edáficas, também do mau uso do solo, em sistemas naturalmente secos, como resultado desta interação entre fatores naturais e humanos, tem-se a redução da fertilidade, da produtividade biológica e econômica das terras áridas, consideradas como contribuinte das mudanças climáticas do planeta (OLIVEIRA GALVÃO & SAITO, 2003).

Dentre os fatores que podem ocasionar a degradação ambiental, Casseti (1991) enfatiza o processo de ocupação por meio da retirada da cobertura vegetal (Figura 3.1), o que torna o solo desprotegido, proporcionando a desagregação mecânica do mesmo. Como consequência desta atividade, as fortes chuvas contribuem para ocorrência de processos erosivos, visto que as águas pluviais não se infiltram no solo, escoando pelas encostas carregando consigo sedimentos detríticos, provenientes das vertentes. Dependendo da quantidade de fluxo por terra, tais fatores podem originar dessoloagem, ravinamento, voçorocamento e até mesmo deslizamentos ou movimentos de massa.

Figura 3.1: Fotografia de desflorestamento de uma área na Chapada do Araripe. Fonte: www.crato.org

A dinâmica de desmatamento depende fortemente do retorno potencial do uso agropecuário do solo (MARGULIS, 2003) e as taxas anuais têm apresentado alta correlação com os preços das principais *commodities* agropecuárias (carne de boi e soja) (BARRETO, 2007). Ao longo do tempo e entre diferentes partes da região, variam os atores e as forças que conduzem ao desmatamento. Grandes e médios produtores geralmente respondem pela maioria dessas atividades, porém pequenos produtores também podem contribuir como força importante nos lugares onde estão concentrados (FEARNSIDE, 2006).

O desmatamento de florestas tropicais tem um importante papel nas emissões globais de gases de efeito estufa. O desmatamento representa cerca de 26% das emissões totais de dióxido de carbono, 48% das emissões de gás metano e 33% das emissões de óxido nitroso; em função disso, o desmatamento contribui com 27% do aumento de efeito estufa provocado por atividades humanas (HOUGHTON, 2005).

Uma parte do CO_2, emitido através das ações de desmatamento, é reabsorvido através do recrescimento de florestas secundárias nas áreas desmatadas, enquanto os outros gases de efeito estufa, tais como metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), não são. Essa quantidade de CO_2 absorvido pelo recrescimento de florestas secundárias é pequena quando comparada à emissão inicial e a biomassa por hectare da floresta secundária é muito mais baixa que a da floresta primária; A taxa de crescimento de floresta secundária é lenta, uma vez

que, a maioria das áreas desmatadas tem como característica a formação de pastagens degradadas com solo compactado e esgotado de nutrientes (FEARNSIDE, 2006).

A redução da perda de floresta representa uma oportunidade, tendo em vista o fato de que maior parte do desmatamento tem como objetivo a produção de pastagem (pouco produtiva), a redução significativa na taxa de desmatamento pode se tornar uma oportunidade econômica para o uso sustentável da floresta, podendo ser incluído a produção de mercadorias tradicionais tanto por manejo florestal para madeira como por extração de produtos não-madeireiros (FEARNSIDE, 2006).

3.2 Chapada do Araripe e Floresta Nacional do Araripe

A Chapada do Araripe abriga um espaço com bioma de características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e vegetação bem diversificada (AUGUSTO & GÓES, 2007). Possui cerca de 180 km de extensão por 50 km de largura, está situada entre as latitudes: 07º 07' e 07º 49' sul e longitude 38º 30' e 40º 55' oeste. Abrange parte dos estados de Pernambuco, Piauí e Ceará sendo sua área majoritária no estado do Ceará. Como vegetação predominante, a floresta subperenófila tropical plúvio – nebular ou floresta de mata úmida, determinada pela altitude e exposição aos ventos úmidos; A floresta subcadocifólia tropical pluvial, ou mata – seca, é predominante em níveis altimétricos mais inferiores; A floresta subcadocifólia xeromorfa ou cerradão é predominante entre 800 e 900 metros de altitude (SUDEC, 1986).

A floresta constitui o elemento natural que define e mantém a qualidade ambiental e conservação de diversos aquíferos, da beleza cênica local, do sistema agropecuário tradicional (característico de pecuária extensiva e agricultura de subsistência) e a conservação dos solos desta região (APA, 1998).

A produção florestal da Chapada do Araripe é absorvida por produtores rurais para atender as necessidades de infra estrutura das propriedades locais, representando uma atividade complementar às atividades agropecuárias nos períodos de estiagem no semiárido. A extração de lenha responde por 70% da demanda energética dos domicílios da região e 35% do parque industrial local. O potencial produtivo de frutos e produtos obtidos de espécies consideradas não madeireiras é reconhecido pelo valor cultural e econômico, dentre as espécies destacam-se o pau de óleo ou Copaíba (*Copaifera langsdorfii*), o jatobá (*Hymenae astignocarpa*), a faveira (*Dimorphandra gardneriana*), janaguba (*Himatanthus drasticu*),

pequi, (*Caryocarc oriaceum*), pitanga (*Eugênia michelli*), cajuí (*Anacardium humile*) e o araçá (*Psidium araçá Raddi*) (AUGUSTO & GÓES, 2007).

Destacam-se também, o complexo algodoeiro/pecuária, a agricultura e o complexo minerador – comandado pela extração de gipsita e calcário laminado, que se encontra em área com pouca recuperação de ambiente degradado. Outras atividades da economia regional, a pecuária de corte/leite, piscicultura, apicultura e caprino/ovinocultura, mandiocultura, produção de milho, feijão e o mel da floração do cipó croapé ou cipó uva (*Cissus rhombifolia*) (OLIVEIRA, 2011)

Em toda região da Chapada do Araripe, onde se conjugam chuvas mais abundantes e regulares a solos menos férteis, observam-se encraves de vegetação de cerrado e uma interpenetração complexa desse e da Caatinga. A estrutura vegetal é, portanto, uma resposta do solo às disponibilidades hídrica e nutricional e às características antrópicas. No que diz respeito a estas influências, pode-se dizer que dos vales, áreas serranas e áreas mais úmidas, não resta muito, pois a cobertura natural foi substituída principalmente pela agricultura. Neste contexto a agricultura itinerante merece destaque pelo seu legado de áreas degradadas e mosaico de áreas em regeneração em diferentes estágios (SAMPAIO, 2010).

A Figura 3.2 ilustra a Chapada do Araripe no seu lado norte localizado na região Sul - cearense.

Figura 3.2: Fotografia do lado norte da Chapada do Araripe, tirada da Ponta da Serra Crato-CE. Fonte: www.nopatio.com.br (2013).

No âmbito da preservação dos recursos hídricos e florestais bem como na melhoria da qualidade de vida dos moradores desta área, foi criada através do Decreto n° 9226, de 02 de maio de 1946, a Floresta Nacional do Araripe – FLONA ARARIPE, que se localiza no topo da Chapada do Araripe, centro da região Nordeste do Brasil e extremo sul do estado do Ceará, compreendendo parte dos municípios de Santana do Cariri, Crato, Barbalha, Missão Velha e Jardim, com relevo tabular, variando de 760 a 920 metros, média pluviométrica de 1000 mm por ano e temperatura variando entre 15 a 25°C (ALVES et al., 2011).

Como iniciativa de política de desenvolvimento humano sustentável, com intuito de diversificação das condições físicas e técnicas das atividades produtivas da região, o Geo Park Araripe foi criado pela Universidade Regional do Cariri (URCA) em 2005 e reconhecido pela UNESCO em 2006, tendo como motivo principal de criação deste patrimônio a Bacia Sedimentar do Araripe (depressão da crosta terrestre onde ocorreu a decomposição de rochas com características específicas), formações geológicas que possuem fósseis singulares, reconhecidas mundialmente por sua diversidade exuberante, além dos registros da passagem de homens primitivos em rochas da região e artefatos líticos que somam a um conjunto de tradições folclóricas. Compreende 59 geossítios preparados para visitação e pesquisa, com forte apelo educacional, conservacionista e de promoção ao geoturismo, considerando as características naturais do Cariri (OLIVEIRA, 2011).

3.3 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto compreende a área do conhecimento que estuda o ambiente terrestre através da análise de dados fornecidos pelas imagens que representam as interações entre a radiação eletromagnética e os alvos presentes na superfície. Ele surge como uma poderosa ferramenta para o monitoramento de mudanças globais. Isto se deve ao fato da visão sinótica e da característica multispectral de suas imagens. (LILLESAND & KIEFER, 1994).

A origem do sensoriamento remoto está ligada às experiências realizadas por Newton no ano de 1672, o qual constatou que um raio luminoso (luz branca), ao atravessar um prisma, decompõe-se em um espectro de cores (região do visível). Desde então outros cientistas ampliaram seus estudos a respeito desta experiência e, assim, observaram que a luz branca era uma síntese de diferentes tipos de luz, uma espécie de vibração composta de muitas vibrações diferentes. Avançando em seus experimentos, os cientistas provaram que o raio de luz era

uma onda eletromagnética, e que a luz visível é apenas uma das muitas diferentes espécies de ondas eletromagnéticas (FERREIRA, 2006).

Segundo Ferreira (2006), conjunto de todos os tipos de radiação eletromagnética é chamado de espectro eletromagnético. Nele cada tipo de energia é ordenado de acordo com o seu comprimento de onda e apresenta subdivisões em função das características de cada região. A porção do espectro eletromagnético que é sensível à nossos olhos é a região do visível, que por sua vez, pode ser dividida em outras faixas, representando as diferentes cores (azul, verde e vermelho). Conforme a Figura 3.3a

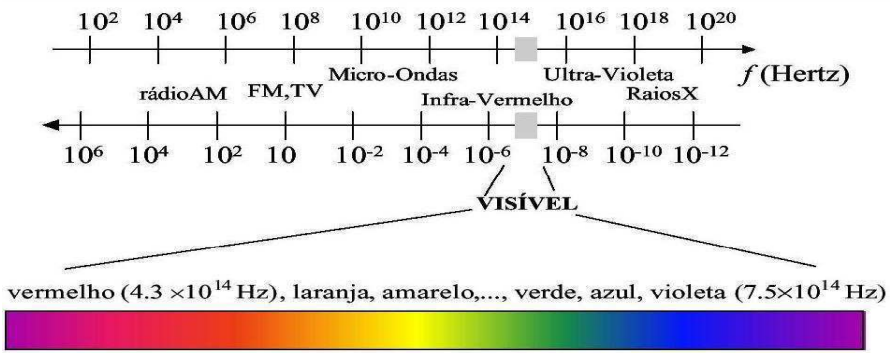

Figura 3.3a: Espectro eletromagnético com destaque colorido para região do visível. Nesta figura as ondas mais curtas estão ordenadas a direita, enquanto que as ondas mais longas estão à esquerda. Fonte: www.crv.educacao.mg.gov.br

O funcionamento do sensoriamento remoto tem como princípio a interações entre a radiação eletromagnética e o alvo. A principal fonte natural de radiação eletromagnética utilizada no sensoriamento remoto é o Sol. O Sol emite radiação para a superfície terrestre através da propagação da radiação eletromagnética pelo espaço, ou seja, ela não precisa de um meio físico para se propagar. Ao incidir na superfície terrestre, parte desta radiação é refletida e retorna para o espaço onde pode ser captada por um sensor remoto a bordo de um satélite que por sua vez retransmite o sinal gravado para uma antena terrestre, conforme Figura 3.3b. (RUDDORF, 2008)

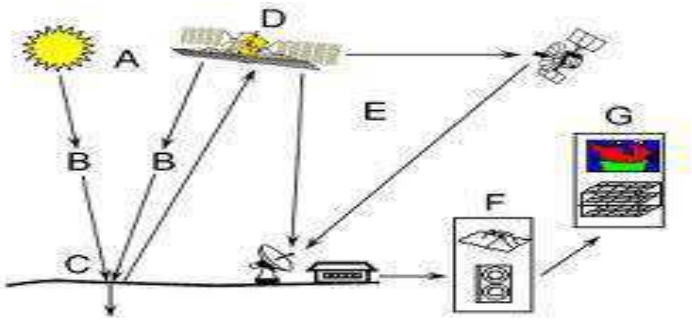

Figura 3.3b: Esquema do funcionamento do sensoriamento remoto (interações entre a radiação eletromagnética e o alvo na superfície da Terra). Fonte: www.geoprocessamentoifgoiass.blogspot.com

Dentre as vantagens da utilização do sensoriamento remoto, temos a acessibilidade em grandes áreas de difícil acesso e o imageamento de grande altitude, possibilitando uma visão sinótica da superfície terrestre e viabilizando, através do imageamento repetitivo, o monitoramento dessas áreas (RODRIGUES, 1990).

É de grande utilidade, tanto na estimativa de parâmetros relacionados à temperatura e radiação, como na construção de modelos físicos ou empíricos, em que os fatores relacionados à evapotranspiração, sejam passíveis de mapeamento remoto, como os seguintes componentes do balanço de energia: fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo e radiação líquida (SANTOS et al., 2007).

A função primordial do processamento digital é fornecer meios para facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens, para posterior interpretação (CROSTA, 1992). A coleta dos dados de referência, ou seja, aqueles que representam a situação real de campo, à época da obtenção da imagem partes essenciais de qualquer projeto de classificação e mapeamento envolvendo dados obtidos por meio de sensoriamento remoto. Esses dados são usados para verificar a acurácia da classificação, bem como detectar distinção entre classes e aperfeiçoar o processo de refinamento da classificação (CONGALTON, 1992).

Para Gurgel et al. (2001), com o advento do sensoriamento remoto orbital, tornou possível o monitoramento da evolução espacial e temporal das mudanças na cobertura da superfície terrestre, permitindo ainda que essas mudanças passassem a ser estudadas de forma objetiva. Fica clara a importância do sensoriamento remoto neste contexto, pois, a obtenção

de informações precisas e em tempo hábil, sobre a extensão, as condições e o potencial de produção das culturas, é de grande importância para a economia de um país (CHEN, 1990).

3.4 Biomassa Acumulada

Segundo Coelho (1982) a biomassa é definida como o conjunto de materiais orgânicos gerados por organismos autótrofos do reino vegetal (fito-massa) ou acumulados nos seres heterótrofos do reino animal (zoo-massa). Os organismos fotossintéticos (autótrofos) são capazes de transformar a energia solar em energia química, mediante a atuação biogeoquímica dos cloroplastos contidos na clorofila das plantas. Essa energia é retida e acumulada nos espaços intermoleculares e é liberada em processos que envolvem oxidação, redução e hidrólise, que podem ser de natureza termoquímica, bioquímica e biológica (SOARES et al., 2006).

Saidelles (2005) afirma que a biomassa e o crescimento das árvores dependem da qualidade do terreno, textura e disponibilidade de nutrientes no solo, características climáticas e da altitude na qual estão localizadas. Também afirma que a determinação da biomassa dos diversos componentes de todas as árvores em um povoamento florestal é inviável ou, impraticável, visto a necessidade da utilização de métodos estimativos que indiquem a derrubada de árvores para ajuste dos modelos e equações, onde se pudessem obter estimativas de biomassa deste povoamento.

A estimativa da biomassa de florestas é um meio importante tanto para efeitos de clima, como também para quantificar o seu uso na geração de vários produtos essenciais para a vida, como madeira, combustível e alimentos. Avaliar a biomassa total acima do solo, que quando expressa em peso por unidade de área, é definida como densidade de biomassa, é uma forma útil de estimar os recursos disponíveis para usos tradicionais. A biomassa presente nas florestas é o resultado da diferença entre a produção por meio da fotossíntese e o consumo pela respiração e exploração dos recursos. Por isso pode ser considerada uma medida de mudanças na estrutura florestal (BROWN, 1997).

A perda de biomassa nas florestas se dá por conta do desmatamento, na mudança da estrutura e na dinâmica florestal, contribuindo para o empobrecimento da biodiversidade, com consequências relacionadas com as emissões de gases de efeito estufa (EWERS et al., 2008).

A estimativa da quantidade de CO_2, liberada para a atmosfera durante atividade de queimada e CH_4 durante processo de decomposição da biomassa são estimados através da

determinação do acumulo da mesma. Estas informações são de fundamental importância para o conhecimento da estrutura e composição, além da dinâmica de diferentes tipos florestais, fundamentais na compreensão dos processos de fotossíntese e evapotranspiração (CARRERIE, 2009).

O uso do sensoriamento remoto tem se mostrado uma importante ferramenta para este propósito. Dentre as metodologias de coletas de dados, incluem desde imagens de satélite até fotografias aéreas capturadas por sensores aerotransportados, além dos dados de Radar e Lidar, e dependendo da tecnologia utilizada, é possível medir até mesmo a altura do dossel, área e densidade de copas, etc. Representando uma forma muito útil para medir estoques de carbono, diminuindo os custos, tempo de coleta em campo e aumentando a área de abrangência (BROWN, 2002; NUNES, 2011).

O modelo da produção de biomassa proposto por Monteith (1972) baseado na radiação solar e no desenvolvimento das folhas tem grande potencial, podendo ser aplicado conjuntamente aos dados de satélite para predições do crescimento da biomassa (MONTEITH, 1972; GOWER et al., 1999).

Entretanto, para a conversão da atividade fotossintética na quantidade de biomassa acumulada nesse modelo, se faz necessário a estimativa da eficiência do uso da luz, bem como o cálculo da fração evaporativa diária. Brandão et al. (2007) em um estudo sobre a determinação da biomassa acumulada em uma área próxima a Chapada do Araripe, concluíram que, o uso deste método contribuirá para a estimativa de parâmetros agronômicos, através da determinação da biomassa, com baixo custo e sem agredir o meio ambiente, uma vez que não se faz necessário a derrubada de árvores.

3.5 Índices de Vegetação.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, que em inglês, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), foi desenvolvido com intuito de salientar o sinal da vegetação fotossinteticamente ativa em condições de pouca biomassa. Através da sua utilização, pode-se estimar o Índice de Área Foliar (IAF), que representa a relação entre a superfície das folhas do dossel e as projeções do terreno analisado (SANCHES-AZOFEIFA et al., 2003).

O índice de área foliar caracteriza-se como algoritmo baseado na transformação de valores de reflectância de determinadas imagens, gerando uma nova imagem com valores em

cada pixel, podendo estar relacionadas às características de vegetação, como a biomassa (DONG, et al., 2003). Este índice tem sido utilizado em estudos de variação sazonal da cobertura vegetal e empregados também em outros processos que requeiram análises multitemporais de vegetação, como acompanhamento de ciclos de culturas agrícolas (MESQUITA JR., 2003).

A evapotranspiração e o fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera são comumente expressos em termos de índice de área foliar, considerados como parâmetro de entrada nos modelos ecológicos e climáticos, com interesse em calcular o índice de área foliar para determinada vegetação, buscando melhor entender a dinâmica florestal e as interações entre floresta e atmosfera, através da investigação das relações entre variação espacial do índice de área foliar e a abertura do dossel, em diferentes tipologias florestais (SELLERS et al., 1986).

Os raciocínios conferidos aos índices de vegetação se baseiam na energia refletida no vermelho e infravermelho próximo, que é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação, também na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais pode, substancialmente, minimizar as principais fontes de ruídos que afetam a resposta da vegetação como variações na irradiância solar; efeitos atmosféricos; contribuições da vegetação não - fotossinteticamente ativa; contribuições do substrato; e efeitos da composição e estrutura do dossel (FERREIRA et al., 2008).

As folhas são órgãos fotossintetizantes por excelência, através do índice de área foliar é possível estimar uma série de parâmetros como produtividade primária e produtividade líquida, uma vez que há uma estreita relação entre o índice de área foliar e a atividade fotossintética ocorrente na área (VARGAS et al., 2002).

3.6 Algoritmo SEBAL

Existem vários algoritmos destinados ao cômputo dos parâmetros climáticos a partir de medições realizadas nas bandas espectrais dos diferentes canais das imagens de satélite. Para o cálculo do albedo de superfície tem sido utilizado com acurácia o algoritmo SEBAL.

(*Surface Energy Balance for Land*) desenvolvido por Bastiaanssen (1995) constitui um dos mais utilizados algoritmos para estudo de fluxo de calor e estimativa da evapotranspiração, com inúmeros trabalhos realizados com auxílio desta ferramenta. Um modelo que, dentre os outros, se notabiliza por fazer poucas relações e suposições empíricas e

por fazer uso de dados multiespectrais de satélites complementados com poucas informações de superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento, que são facilmente obtidas nas estações meteorológicas (NICÁCIO, 2008). O SEBAL já foi validado em vários ecossistemas mundiais, como Egito, Espanha, Portugal, França, Itália, Argentina, China, Índia, Paquistão, Nigéria, Zâmbia, Etiópia, Estados Unidos, Novo México, etc. (TASUMI, 2003).

Destaca-se entre os demais algoritmos pelas seguintes razões: consiste em um algoritmo baseado fisicamente em análises de imagens de satélite e requer um mínimo de informações meteorológicas; faz uso de um grande número de variáveis ambientais e não assume constantes espacialmente; é reduzida a necessidade da correção atmosférica das informações em comprimento de onda curta térmica das imagens, além de não somente ser aplicado com o uso de imagens Landsat, mas também pode ser aplicado juntamente com o uso de outros sensores (TASUMI, 2003; ANDRADE, 2008).

O modelo SEBAL, é baseado no balanço dos fluxos de energia a superfície que é proporcional ao saldo de radiação. O balanço de radiação ou saldo de radiação (R_n), por sua vez, consiste na diferença da radiação de ondas curtas que incide e reflete da superfície e da radiação de ondas longas incidente, refletida e emitida pela superfície. Desta forma, o saldo de radiação pode ser definido como a energia radiativa superficial, disponível para os diversos processos biofísicos, principalmente a evapotranspiração. (FERRAZ et al., 2009).

O SEBAL requer poucos dados de superfície e imagens de satélite como elementos de entrada, possibilitando a determinação da temperatura, albedo, índices de vegetação para o cômputo de R_n. O calor latente é obtido como resíduo da equação do balanço de energia, a partir da determinação dos fluxos de calor sensível e de calor no solo (BORGES, 2008).

Esse algoritmo faz uso apenas das radiâncias espectrais registradas em sensores de satélites e de um conjunto mínimo de dados meteorológicos que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar para calcular o balanço de energia à superfície da terra, obtendo a estimativa da evapotranspiração nas escalas horária e diária (COURAULT et al., 2002). Leva em consideração a variabilidade espacial de muitos elementos micro-meteorológicos, através de funções semi empíricas e pode ser aplicado em diversos agrossistemas. O referido algoritmo é capaz de realizar estimativas precisas da evapotranspiração de áreas agrícolas relativamente horizontais (DI PACE et al., 2008).

3.7 Algoritmo CASA

O *Carnegie Ames Stanford Approach* (CASA) é um modelo processual de biosfera terrestre e correntemente aplicado a escalas globais, baseado em dados meteorológicos e provenientes de detecção remota para variáveis biofísicas da vegetação. A sua utilização tem envolvido a contabilização de balanços de carbono a nível global, avaliação de tendências interanuais de produtividade e análise de padrões e ciclos intra-anuais no comportamento da vegetação. (CARVALHAIS et al., 2004)

O algoritmo CASA é considerado um modelo de eficiência de produtividade, ou de diagnóstico, baseado na assimilação de dados meteorológicos (temperatura, precipitação e radiação solar) e de dados provenientes de detecção remota, traduzindo propriedades biofísicas da vegetação, tais como índice de área foliar (IAF) e fração da radiação fotossinteticamente ativa (APAR) (CARVALHAIS et al., 2010).

Alguns estudos mostram a eficiência da aplicação deste modelo para a determinação da biomassa vegetal. Brandão et al. (2007) analisando a influência do NDVI, para a estimativa da biomassa na Chapada do Araripe, combinando a utilização do modelo CASA e o algoritmo SEBAL, observaram que este método fornece valores consistentes para a determinação da biomassa acumulada, podendo ser aplicado para quaisquer satélites, contribuindo de maneira significativa para a estimativa de parâmetros agronômicos com baixo custo.

Andrade et al. (2009) estudando a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na determinação de biomassa vegetal de pastagem no Mato Grosso do Sul, também observaram a eficiência desta metodologia, evidenciando seu grande potencial de aplicação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Região de Estudo

A região estudada foi a Chapada do Araripe que abrange parte dos estados de Pernambuco, Piauí e Ceará sendo sua área majoritária no estado do Ceará, conforme a Figura 4.1.

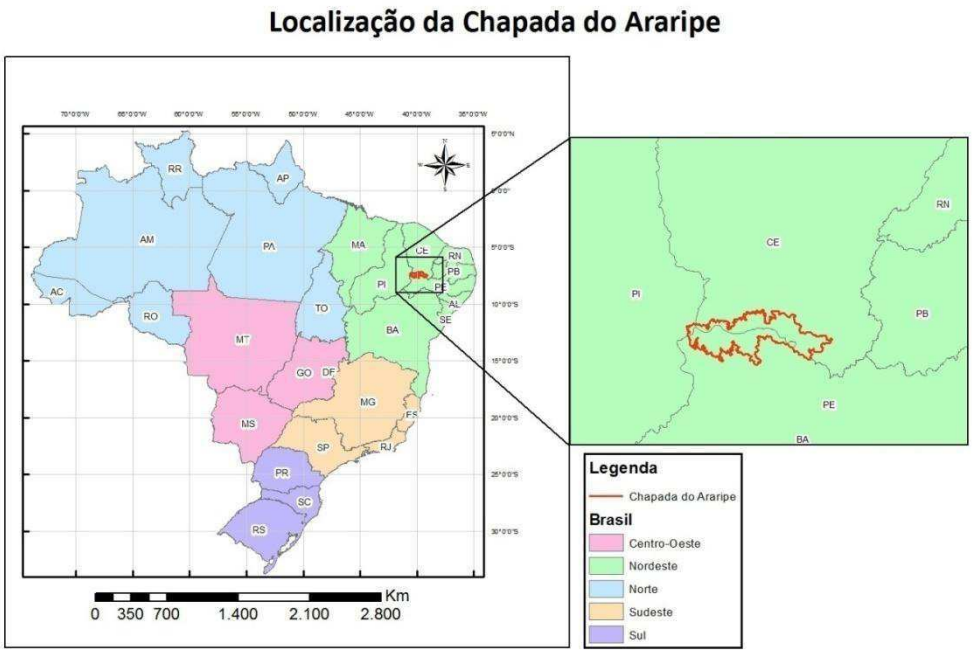

Figura 4.1: Mapa do Brasil, com destaque para a Chapada do Araripe (amarelo).

Medindo cerca de 180 quilômetros de comprimento no seu maior eixo leste/oeste, e com uma variação de cerca 30 a 70 quilômetros de largura no seu eixo norte/sul, a Chapada do Araripe possui uma forma tabular. No topo da Chapada, a sua área é de 7.500 km^2 e sua altitude varia de 700 a 1000 m. Suas coordenadas geográficas são: 38º 30’ a 40º 55’ de longitude Oeste e 7º 07’ a 7º 49’ de latitude sul, conforme citado por Limaverde (2007).

4.2 Aquisição das Imagens de Satélite:

A determinação da Biomassa Acumulada na Chapada do Araripe foi feita a partir de imagens do sensor TM (Thematic Mapper), do satélite Landsat 5, adquiridas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (www.inpe.br) compostas por 7 bandas espectrais.

As imagens utilizadas foram da órbita 217 ponto 65, nas datas de 30/07/2006, 18/08/2007, 21/09/2008, 24/09/2009, 13/10/2010 e 29/08/2011, a que correspondem aos Dias de Ordem do Ano (DOA) de 211, 230, 265, 267, 286, 241, respectivamente.

4.3 Processamento das Imagens

O processamento das imagens de satélite foi feito com o auxilio de modelos desenvolvidos através da ferramenta Model Maker do software Erdas Imagine 8.5.

4.4 Algoritmos Utilizados

Para determinação da biomassa vegetal acumulada na Chapada do Araripe foram desenvolvidos modelos baseados nos algoritmos SEBAL *(Surface Energy Algorithm for Land)* e CASA *(Carnegie Ames Stanford Approach),* a combinação entre estes modelos além das etapas computacionais para a determinação da biomassa acumulada é apresentada no fluxograma da Figura 4.2.

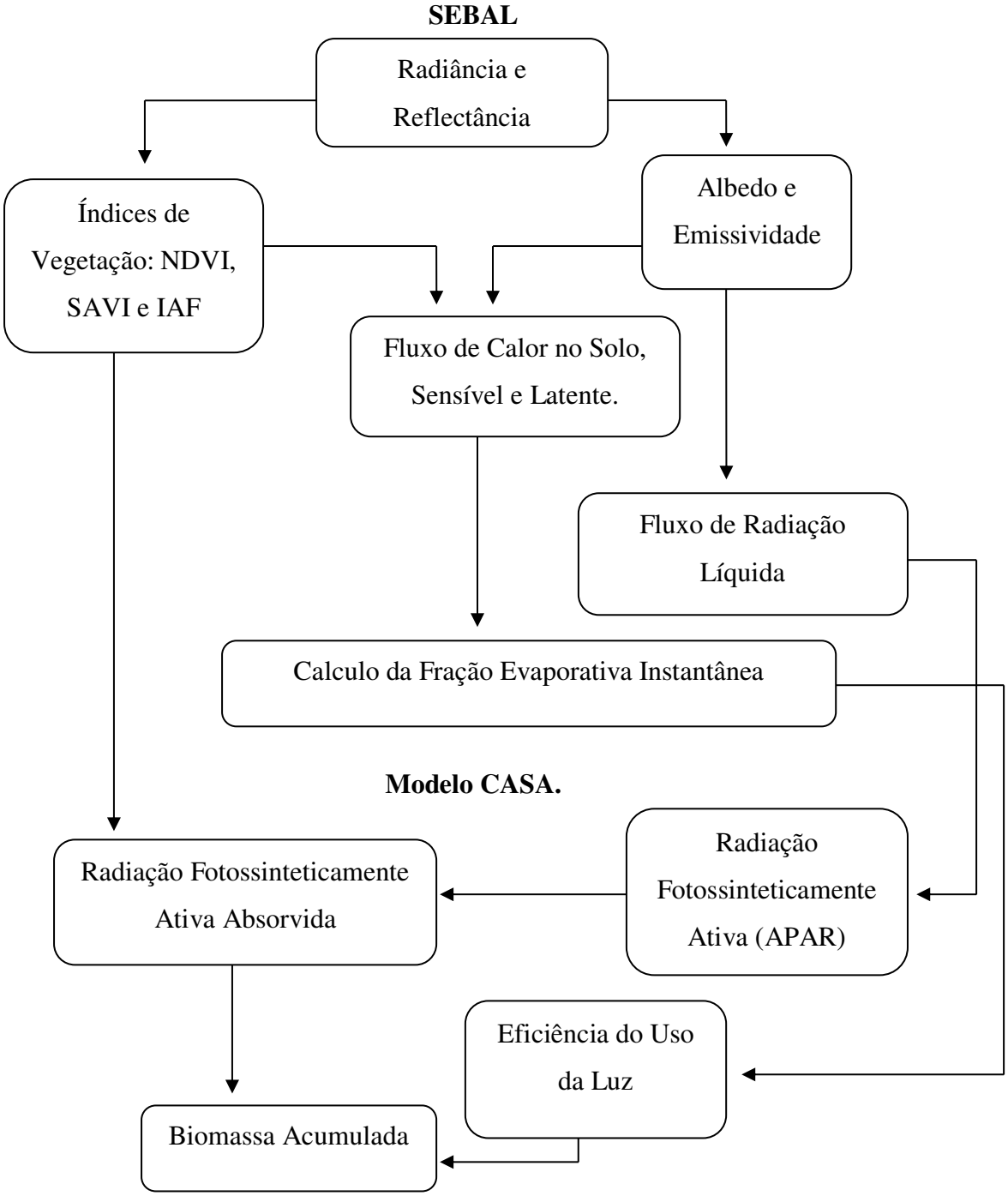

Figura 4.2: Fluxograma das etapas computacionais e combinação entre os algoritmos SEBAL e CASA para obtenção da biomassa acumulada.

4.5 Calibração Radiométrica

Inicialmente realizou-se a calibração radiométrica ou radiância espectral, onde o numero digital (DN) de cada pixel da imagem foi convertido em radiância espectral monocromática refletida, através da equação de Markham e Baker (1987).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) \times DN - L_{MIN} \qquad (4.1)$$

onde L_{MAX} *e* L_{MIN} são as radiâncias espectrais máxima e mínima (W $m^{-2}sr^{-1}$ μm^{-1}, ver Tabela 4.1), DN é o numero digital de cada pixel da imagem.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de L_{MAX} *e* L_{MIN} utilizados neste trabalho e propostos por Chander & Markham (2003) para datas após 04 de maio de 2003.

Tabela 4.1 – Constantes de calibração espectral para o Landsat 5 – TM (proposta para datas após 04 de maio de 2003).

Banda	L_{MIN} **(W.m^{-2} .ster^{-1} .µm^{-1})**	L_{MAX}**(W.m^{-2} .ster^{-1} .µm^{-1})**
1	-1,52	193,0
2	-2,84	365,0
3	-1,17	264,0
4	-1,51	221,0
5	-0,37	30,2
6	1,2378	15,303
7	-0,15	16,5

4.6 Reflectância Monocromática (ρ_{λ})

Após a calibração Radiométrica o próximo passo foi o computo da reflectância monocromática (ρ_{λ}), determinada como a razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente obtido pela equação 4.2 (ALLEN et al., 2002):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta \cdot dr} \tag{4.2}$$

onde L_λ é a radiância espectral, computada no passo anterior (4.1); $ESUN_\lambda$ é a irradiância solar espectral de cada banda incidente no topo da atmosfera (W m^{-2} μm^{-1}), em que valores válidos para dados radiométricos originados do Landsat 5 após 4 de maio de 2003, propostos por Chander e Markham (2003), apresentados na Tabela 4.2; θ é o ângulo zenital solar; e d_r é o inverso do quadrado da distancia media Terra-Sol, obtida pela Equação 4.3.

Tabela 4.2 – Valores de $ESUN_\lambda$ em W m^{-2} μm^{-1} validos para o Landsat5.

	Banda 1	**Banda 2**	**Banda 3**	**Banda 4**	**Banda 5**	**Banda6**	**Banda7**
Landsat 5	1967	1826	1554	1036	215,0	-	80,67

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(DOA \frac{2\pi}{365} \right) \tag{4.3}$$

onde *DOA* é o numero de ordem do ano correspondente ao dia da imagem, conforme Silva (2010), o valor médio anual de d_r é igual a 1,00 variando entre 0,97 e 1,03 aproximadamente.

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de DOA, d_r e do cós θ das imagens utilizadas neste estudo para a hora da passagem do satélite (09:45).

Tabela 4.3 – Datas das imagens e seus respectivos valores de *DOA*, d_r e cos θ.

Data da imagem	***DOA***	d_r	**cos θ**
30/07/2006	211	1,024	0,821
18/08/2007	230	1,026	0,896
21/09/2008	265	0,973	0,876
24/09/2009	267	1,028	0,862
13/10/2010	286	1,026	0,806
29/08/2011	241	1,016	0,768

Ainda conforme Silva (2010), quando a área de estudo tiver uma declividade nula ou for constituída por uma pequena área, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido através do ângulo de elevação solar (esse valor é encontrado no cabeçalho das imagens).

4.7 Albedo Planetário

O próximo passo foi a obtenção do albedo planetário, obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas (ρ_λ) e o coeficiente de regressão (λ), para cada banda dada pela equação 4.4 proposta por Bastiaanssen (2000) e utilizado por Silva et al.(2005),

$$\alpha_{top} = \varpi_1 \times \rho_1 + \varpi_2 \times \rho_2 + \varpi_3 \times \rho_3 + \varpi_4 \times \rho_4 + \varpi_5 \times \rho_5 + \varpi_7 \times \rho_7 \tag{4.4}$$

onde ρ_1, ρ_2, ρ_3, ρ_4, ρ_5 e ρ_7: são as reflectâncias espectrais de cada banda 1, 2, 3, 4, 5 e 7 respectivamente.

O cálculo dos coeficientes de regressão linear para cada banda espectral (ϖ_1, ϖ_2, ϖ_3, ϖ_4, ϖ_5 e ϖ_7), é feito pela equação 4.5, e seus valores são apresentados na Tabela 4.4. propostos por Allen et al. (2002).

$$\varpi_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \tag{4.5}$$

onde λ assume os valores 1; 2; 3; 4; 5 e 7.

Tabela 4.4 – Coeficientes de regressão linear para cada banda espectral para imagem TM Landsat 5 por Allen et al. (2002).

	ϖ_1	ϖ_2	ϖ_3	ϖ_4	ϖ_5	ϖ_6	ϖ_7
Landsat 5 - TM	0,293	0,274	0,233	0,157	0,033	-	0,011

4.8 Albedo da Superfície

O albedo da superfície foi obtido pela equação 4.6 que expressa a razão entre a radiação solar refletida pela radiação solar incidente na superfície, esse termo é o primeiro do balanço de radiação.

$$\alpha = \frac{\alpha_{top} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \tag{4.6}$$

onde τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, dada pela equação 4.7, obtida para condições de céu claro em função da altitude local (z). α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04. No SEBAL, este valor geralmente é considerado igual a 0,03 (BASTIAANSEN, 2000; SILVA et al., 2005) o qual foi utilizado neste trabalho.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z \tag{4.7}$$

Como a área de estudo, possui uma inclinação considerável, o ângulo de incidência da radiação solar depende do azimute da normal da superfície. Com isto foi necessário obter o Modelo de Elevação Digital da área (DEM), o qual foi utilizado na equação para fornecer os valores de z pixel a pixel, ou seja, z = DEM. Esse DEM foi obtido gratuitamente no Site da Embrapa Relevo (*www.relevobr.cnpm.embrapa.br)*, e para a área de estudo foi composto pelo mosaico de duas imagens (sb-24-y-d e sb-24-z-c).

4.9 Índices de Vegetação

O *NDVI – Normalized Difference Vegetation Index* ou índice de vegetação por diferença normalizada foi obtido pela equação 4.8 proposto por Rouse et al. (1973). Esta equação expressa a razão entre a diferença das reflectâncias do infravermelho próximo (ρ_4) e do vermelho (ρ_3) e a soma dessas reflectâncias. Seu resultado indica condições de densidade e porte da vegetação.

$$NDVI = \rho_4 - \rho_3 \ / \ \rho_4 + \rho_3 \tag{4.8}$$

O *SAVI* – Soil Adjusted Vegetation Index ou índice de vegetação ajustado para os efeitos do solo é um índice de vegetação proposto a amenizar os efeitos de background do solo, este termo foi obtido pela equação 4.9 (HUETE, 1988):

$$SAVI = 1 + L \quad \rho_4 - \rho_3 \ / \ L + \rho_4 + \rho_3 \tag{4.9}$$

onde L é um fator de ajuste ao solo neste trabalho utilizou-se L = 0,1 segundo Bezerra (2006).

O índice de área foliar (*IAF*) é um indicador de biomassa de cada pixel de uma imagem, pois compreende a razão entre a área foliar de toda vegetação em um dado pixel, pela área desse pixel, tal parâmetro foi computado pela equação 4.10 proposta por Allen et al. (2002).

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \tag{4.10}$$

4.10 Emissividades

Para obtenção da temperatura da superfície utilizou-se a equação de Planck invertida, proposta para um corpo negro. Como o alvo não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, faz-se necessário inserir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ε_{NB}, para o computo da temperatura de superfície T_S. Enquanto que, para o cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, considera-se a emissividade no domínio da banda larga ε_0 (5 – 100 µm). Foram utilizadas as equações 4.11a e 4.11b, propostas por Allen et al. (2002), para o computo das emissividades ε_{NB} (Termal) e ε_0 (Superfície) ambas em função do *IAF*.

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \cdot IAF \tag{4.11a}$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \tag{4.11b}$$

No presente trabalho foram considerados $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$, quando $IAF \geq 3$, e para $NDVI < 0$, caso de corpos de água considerou-se $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$ (ALLEN et al., 2002).

4.11 Temperatura da Superfície

O cômputo da temperatura da superfície (T_S), em Kelvin, foi determinada através da equação 4.12, que representa a equação de Planck invertida (mencionado anteriormente) em função da radiância espectral da banda L_6, (banda termal) e da emissividade termal ε_{NB}.

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_6} + 1\right)} \tag{4.12}$$

onde K_1 e K_2 são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 – TM, iguais a 607,76 W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1} e 1260,56 W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}, respectivamente.

4.12 Radiação de Onda Longa Emitida

O próximo passo para obtenção do balanço de radiação calculado através do algoritmo SEBAL é o fluxo de radiação de onda longa (termal) emitida pela superfície, a qual foi computada através da equação de Stefan-Boltzmann, em função da temperatura e da emissividade da superfície, conforme a equação 4.13.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_S^4 \tag{4.13}$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman (σ = 5,67.10^{-8} W m^{-2} K^{-4}), T_S e ε_0 já foram mencionados anteriormente.

4.13 Radiação de Onda Longa Incidente

Como a radiação de onda longa emitida, a radiação de onda longa incidente, ou radiação emitida pela atmosfera na direção da superfície, em W m^{-2}, também é calculada pela equação de Stefan-Boltzmann, em função da emissividade atmosférica (ε_a) e da temperatura do ar (Ta), a qual foi obtida na Estação Meteorológica de Barbalha (82784).

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \tag{4.14}$$

onde ε_a é a emissividade atmosférica, obtida pela equação 4.15 proposta por Bastiaanssen, (1995); Allen et al.(2002).

$$\varepsilon_a = 0,85 \cdot \ -\ln \tau_{sw}{}^{\ 0,99} \tag{4.15}$$

onde τ_{sw} é a transmissividade atmosférica dada pela equação 4.7

4.14 Radiação de Onda Curta Incidente

A radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) corresponde ao fluxo de radiação solar (direta e difusa) que atinge a superfície terrestre, sendo ela o segundo termo do balanço de radiação, que, para condição de céu claro, foi obtida pela equação proposta por Bastiaanssen, (1995); Morse et al.(2000):

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \times \cos\theta \times dr \times \tau_{sw} \tag{4.16}$$

onde G_{sc} é a constante solar (1367 W m^{-2}), e os demais termos já foram previamente definidos.

4.15 Saldo de Radiação

O saldo de radiação à superfície (R_n) foi computado utilizando a equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = 1-\alpha \;\; R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - 1-\varepsilon_0 \;\; R_{L\downarrow} \tag{4.17}$$

onde o valor de R_n é expressos em W.m^{-2}.

4.16 Fluxo de Calor no Solo (G)

O fluxo de calor no solo, em W.m^{-2}, foi obtido pela equação empírica proposta por Bastiaanssen (2000), a qual representa valores próximos ao meio dia.

$$G = \left[\frac{T_S}{\alpha} \;\; 0,0038 \cdot \alpha + 0,0074 \cdot \alpha^2 \quad 1 - 0,98 \cdot NDVI^4 \right] \cdot R_n \tag{4.18}$$

onde Ts é a temperatura da superfície (ºC), α é o albedo da superfície, NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada e Rn é o saldo de radiação, todos computados em passos anteriores. Para NDVI < 0 casos de corpos de água, considera-se G = 0,3 R_n. Segundo Bezerra (2006) é necessidade a realização de estudos específicos para uma melhor definição dessa relação em diferentes reservatórios do Nordeste do Brasil.

4.17 Fluxo de Calor Sensível (H)

Segundo Bezerra (2006) por envolver uma serie de considerações e pressupostos, o fluxo de calor sensível (H), em W m^{-2}, constituiu a etapa computacional que mais exige atenção, pois quando feita de maneira equivocada pode incorrer em erros grosseiros. A estimativa de H é feito com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos à superfície. De acordo com Bastiaanssen et al. (1998) o fluxo de calor sensível pode ser obtido pela equação 4.19.

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \tag{4.19}$$

onde ρ é a densidade do ar úmido (kg m^{-3}), que neste estudo foi utilizada ρ = 1,15kg m^{-3}, c_p é o calor específico do ar à pressão constante (1004J.kg^{-1}. K^{-1}), dT é a diferença de temperatura entre dois níveis próximos à superfície e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s.m^{-1}).

Para o cômputo de H foi necessário a escolha de dois pixels na cena denominados "pixels âncoras", para se determinar a variação de temperatura (dT), entre dois níveis de referência, bem como a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) em todos os pixels da área estudada.

A Figura 4.3 apresenta um esquema representativo do resumo das etapas computacionais para o cálculo de H.

Inicialmente, foram reunidas as informações sobre a velocidade do vento u (m.s^{-1}), altura media da vegetação h (m), tais parâmetros foram obtidos na estação meteorológica local. A primeira etapa consiste na obtenção do coeficiente de rugosidade (z_{om}) da estação meteorológica que é calculado em função da altura média da vegetação, segundo equação de Brutsaert (1982):

$$Z_{om} = 0{,}12 \cdot h \tag{4.20}$$

Neste trabalho os dados foram colhidas na Estação Meteorológica de Barbalha-CE (82784). No entanto, para o estudo usou-se a altura média igual a 0,30 m para todas as imagens.

Logo após foi computada a velocidade de fricção u_* (m.s^{-1}) usando o perfil logarítmico do vento para a condição de estabilidade neutra:

$$u_* = \frac{K_{ux}}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \tag{4.21}$$

onde K é a constante de Von Karman (K = 0,41), u_* é a velocidade do vento (m.s^{-1}) na altura Z_x, no presente estudo tomou-se x = 2 m e Z_{0m} é a coeficiente de rugosidade (m). A Tabela 4.5 apresenta a velocidade do vento, u_*, no momento da passagem do satélite.

Tabela 4.5 – Velocidade do vento para o momento da passagem do satélite e suas respectivas datas.

DATAS DAS IMAGENS	VELOCIDADE DO VENTO (m s^{-1})
30/07/2006	3,67
18/08/2007	2,90
21/09/2008	2,46
24/09/2009	3,04
13/10/2010	3,08
29/08/2011	2,90

Fonte: INMET - ESMET Barbalha.

Ainda considerando a atmosfera em equilíbrio neutro, estimou-se a velocidade do vento, para o nível de 100 m, u_{100} (ms^{-1}), a qual é chamada de *blendingheight* onde se assume que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis dada pela equação 4.22.

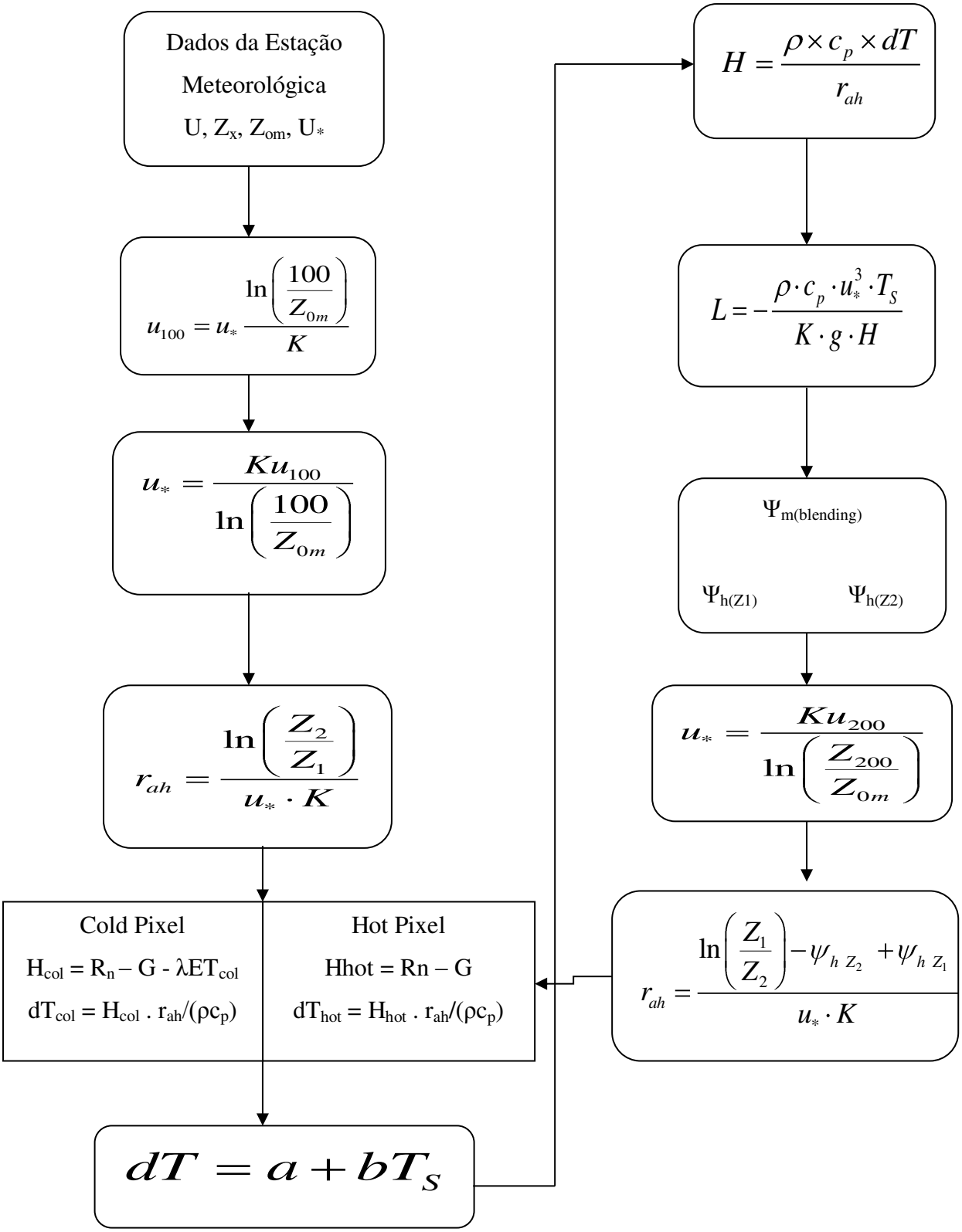

Figura 4.3: Fluxograma das etapas para obtenção do fluxo de calor sensível.

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)}{K} \tag{4.22}$$

Levando em conta a suposição que u_{100} é constante para toda a cena estudada, foi obtido a velocidade de fricção u_* (m s^{-1}) para todos os pixels da cena em estudo, através da equação 4.23

$$u_* = \frac{K u_{100}}{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)} \tag{4.23}$$

onde Z_{0m} (m) foi obtido, pixel a pixel, em função do SAVI, segundo equação 4.24 proposta por Bastiaanssen (2000).

$$Z_{0m} = \exp\ -5,809 + 5,62 \cdot SAVI \tag{4.24}$$

Após a obtenção dos valores de u_*, para toda cena, e admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra foi estimada a resistência aerodinâmica r_{ah} (s m^{-1}) através da equação 4.25.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot K} \tag{4.25}$$

onde Z_1 e Z_2 são as alturas, em metros acima da superfície, as quais foram consideradas neste estudo como sendo, Z_1 = 0,1 m e Z_2 = 2,0 m e K é a constante de Von Karman (0,41).

A próxima etapa foi o cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície dT (°C) pixel a pixel da cena estudada, que é computada através da relação linear entre dT e Ts, conforme a equação 4.26:

$$dT = a + bT_S \tag{4.26}$$

onde a e b são coeficientes da relação linear obtidos a partir dos pixels âncoras (quente e frio).

O pixel "frio" encontra-se numa área de floresta, assumindo que o fluxo de calor sensível é nulo, e o fluxo de calor latente é máximo e dado pela diferença entre o Rn e o G.

$$LE_{frio} = Rn_{frio} - G_{frio} \tag{4.27}$$

Sendo assim, a diferença de temperatura do pixel frio é nula.

Já para o pixel quente ocorre o inverso, ou seja, é escolhido numa área com grande exposição de solo e considera-se que o fluxo de calor latente é nulo e o fluxo de calor sensível é máximo e dado pela relação $H_{quente} = Rn_{quente} - G_{quente}$. E a diferença de temperatura do pixel quente é dada por.

$$dT = \frac{H_{quente} \cdot r_{ah}}{\rho \cdot c_p} \tag{4.28}$$

O valor de H obtido inicialmente, para cada pixel, não é representativo e serve apenas com valor inicial de um processo iterativo e que nas etapas seguintes é necessário refiná-lo considerando efetivamente, a condição de estabilidade de cada pixel.

Dessa forma, o comprimento de Monin-Obukhov L (m) é utilizado para definir as condições de estabilidade atmosférica e é computado em função dos fluxos de calor e de momentum pela Equação 4.29 (BASTIAANSSEN, 1995; MORSE et al., 2000; ALLEN et al., 2002).

$$L = -\frac{\rho \cdot c_p \cdot u_*^3 \cdot T_S}{K \cdot g \cdot H} \tag{4.29}$$

onde ρ, c_p já foram definidos anteriormente, u_* é a velocidade de fricção de cada pixel das imagens, em $m.s^{-1}$, Ts é a temperatura da superfície (K) em cada pixel, K é a constante de Von Karman, g é o módulo do campo gravitacional terrestre (9,81 m s^{-1}) e H é o primeiro valor obtido do fluxo de calor sensível (W m^{-2}), pixel a pixel, considerando a condição de neutralidade. Os valores de L definem as condições de estabilidade obedecendo aos seguintes critérios: se $L < 0$, isso implica em uma atmosfera considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

De acordo com as condições atmosféricas, deverão ser considerados os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h). Para isto,

utiliza-se das formulações (BASTIAANSSEN, 1995, MORSE et al., 2000; ALLEN et al., 2002; BEZERRA, 2004; FEITOSA, 2005):

Para L < 0 (condição de instabilidade) tem-se que:

$$\psi_{m\,100} = 2\ln\left(\frac{1+X_{100m}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+X_{100m}^{\;2}}{2}\right) - 2arctg\;\; X_{100m} \;\; + 0{,}5\pi \tag{4.30}$$

$$\psi_{h\;2m} = 2\ln\left(\frac{1+X_{2m}^{\;2}}{2}\right) \tag{4.31}$$

$$\psi_{h\;0{,}1m} = 2\ln\left(\frac{1+X_{0{,}1m}^{\;2}}{2}\right) \tag{4.32}$$

Em que:

$$X_{100} = \left(1-16\frac{100}{L}\right)^{0{,}25} \tag{4.33}$$

$$X_{2m} = \left(1-16\frac{2}{L}\right)^{0{,}25} \tag{4.34}$$

$$X_{0{,}1m} = \left(1-16\frac{0{,}1}{L}\right)^{0{,}25} \tag{4.35}$$

Para L > (condição de estabilidade) tem-se que:

$$\psi_{m\ 200m} = -5\left(\frac{100}{L}\right) \tag{4.36}$$

$$\psi_{m\ 2m} = -5\left(\frac{2}{L}\right) \tag{4.37}$$

$$\psi_{m\ 0,1m} = -5\left(\frac{0,1}{L}\right) \tag{4.38}$$

Para L = 0 (Condição de neutralidade): $\psi_m = 0$ e $\psi_h = 0$.

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

$$u_* = \frac{u_{100} \cdot K}{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right) - \psi_{m\ 100m}} \tag{4.39}$$

onde u_{100} é a velocidade do vento a 100 m (ms^{-1}), K é a constante de Von Karman, Z_{0m} é o coeficiente de rugosidade pixel a pixel (m) e $\psi_{m(100)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100 m de altura.

Com a obtenção dos valores corrigidos de u_*, foi possível computar o valor corrigido da resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (s m^{-1}) por meio da Equação 4.40. (BASTIAANSSEN, 1995, MORSE et al., 2000; ALLEN et al., 2002; BEZERRA, 2004; FEITOSA, 2005):

$$r_{ah} = \frac{\ln\frac{Z_2}{Z_1} - \psi_{h\ Z_2} + \psi_{h\ Z_1}}{u_* \cdot K} \tag{4.40}$$

onde Z_2 = 2,0 m, Z_1 = 0,1 m, $\psi_{h(Z2)}$ e $\psi_{h(Z1)}$ representam respectivamente as correções de estabilidade ao transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m de altura.

Após a obtenção dos valores desses parâmetros retornou-se ao cômputo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os passos mencionados anteriormente, até a obtenção

da estabilidade dos valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência aerodinâmica (r_{ah}) para o pixel quente.

4.18 Fluxo de Calor Latente (LE)

O computo do fluxo de calor latente LE (W m^{-2}) foi possível pela simples subtração entre o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível:

$$LE = R_n - G - H \tag{4.41}$$

onde LE é o valor do fluxo de calor latente no momento da passagem do satélite, R_n, G e H já foram definidos anteriormente.

4.19 Fração Evaporativa Instantânea (Λ)

A fração evaporativa instantânea (SHUTTLEWORK et al., 1989), que traduz as alterações devido à umidade do solo, é considerada similar a de 24h, e é um parâmetro usado como entrada no algoritmo CASA para determinação da biomassa. Como também, usada para calcular a evaporação real de 24h dos fluxos instantâneos do calor latente. Pela Equação (4.42).

$$\Lambda = \left(\frac{LE}{R_n} - G \right) \tag{4.42}$$

O fluxo do calor latente (λE) associado com as perdas evaporativas é o processo dominante da troca da energia em áreas vegetadas. A radiação de ondas curtas incidente, ($R_S\downarrow$), fornece a energia para a fotossíntese, a transpiração e a evaporação, tornando assim o seu estudo um bom meio de estimar as trocas da energia na atmosfera.

4.20 Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR)

A Radiação Fotossinteticamente Ativa (0,4-0,7μm), que é parte da radiação solar de ondas curtas incidente (Rs↓) (0,3 - 3,0μm) é potencialmente útil para a fotossíntese. A PAR varia principalmente com a visibilidade, a camada de ozônio e a cobertura de nuvens. Entretanto, um valor aceito para representar a PAR deve estar entre 45 e 50% do valor da Rs↓ em 24 horas. Assim, calculou-se a PAR através da Equação (4.43).

$$PAR = 0,48 \cdot R_{S\downarrow 24} \tag{4.43}$$

onde $R_{s\downarrow 24}$ é a radiação solar de ondas curtas incidente em 24 horas de acordo com De Bruin (1987), dado pela equação 4.44.

$$R_{n24} = 1-\alpha \;\; R_{s\downarrow 24h} - a\tau_{sw24h} \tag{4.44}$$

onde α é o albedo, $R_{s\downarrow 24h}$ é a radiação solar incidente média diária (W m^{-2}) e a é um coeficiente de regressão entre o saldo de radiação de onda longa diário e a transmissividade atmosférica diária. O valor de a foi obtido por meio de calibração do modelo acima com base nos dados observados na área em estudo. A transmissividade atmosférica média diária foi obtida através da equação 4.45.

$$\tau_{SW\,24h} = \frac{R_{S\downarrow 24h}}{R_{SW\downarrow TOA24h}} \tag{4.45}$$

onde $R_{S\downarrow 24h}$ é a radiação solar diária incidente a superfície dada em W m^{-2}, que foi obtida na estação meteorológica de Barbalha, $R_{SW\downarrow TOA24h}$ é a radiação solar diária incidente no topo da atmosfera (W m^{-2}), calculada segundo procedimentos descritos em Iqbal (1984).

4.21 Porção Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa (APAR).

Como nem toda a PAR é absorvida foi mostrado que a Porção Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa (APAR) se relaciona com a PAR através da Equação (4.46).

$$APAR = f.PAR \tag{4.46}$$

onde f é a proporção da radiação disponível em faixas específicas do espectro onde a vegetação absorve a radiação fotossinteticamente ativa. É dada pela Equação (4.47) proposta por Bastiaanssen et al.(2003).

$$f = -0,161 + 1,257 \cdot NDVI \tag{4.47}$$

4.22 Biomassa Acumulada

Para obtenção da biomassa acumulada, foi utilizado o produto da APAR (Porção Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa) pelo fator ε, que é a eficiência do uso da

luz. Assim, ε foi determinado considerando as variações sazonais, e também os diferentes biomas, conforme Field (1995).

$$\varepsilon\ \ x,t\ \ = \varepsilon'\ \ x,t\ \ \times T_1(x,t) \times T_2\ \ x,t\ \ \times \Lambda \tag{4.48}$$

onde ε é a variável corrigida no tempo e no espaço do fator de eficiência da luz, ε', é o valor uniformizado máximo global dado como 2,5 ($g.MJ^{-1}$) e Λ é a fração evaporativa instantânea. As temperaturas T_1 e T_2 estão relacionadas ao ajuste do crescimento da planta pela temperatura onde:

$$T_2 = 1{,}185\left[1 + \exp\ \ 0{,}2T_{opt} - 10 - T_{mem}\ \ \right]^{-1}\ \ 1 + \exp\left[0{,}3\ \ -T_{opt} - 10 + T_{mem}\ \ \right]^{-1} \tag{4.49}$$

onde T_{opt} é a temperatura média durante o mês de máximo NDVI, e T_{men} é a média mensal da temperatura do ar. A temperatura T_1 é dada por:

$$T_1 = 0{,}8 + \ \ 0{,}02T_{opt}\ \ - \left[0{,}0005\ \ T_{opt}\ \ ^2\right] \tag{4.50}$$

Após a determinação da eficiência do uso da luz (ε), temos a biomassa acumulada, computada pela Equação (4.51).

$$Bio_Acum = APAR \cdot \varepsilon \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \Lambda \tag{4.51}$$

onde Bio_Acum é a biomassa vegetal acumulada acima do solo no período t. Esta equação é a base do CASA, onde é calculada a biomassa através dos dados de sensoriamento remoto, sendo seus valores avaliados sob a influência do NDVI.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Elementos Constituintes das Cenas Estudadas

A cena estudada constitui uma área bem heterogênea formada pela Chapada do Araripe e pelos centros urbanos localizados em seu redor, como também áreas de pastagem, agricultura de subsistência e vegetação nativa densa (Floresta Nacional do Araripe). Na divisa dos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Conforme apresentada na Figura 5.1, que é uma composição RGB formada pelas bandas 4, 3 e 2 do sensor TM.

A região localizada a barlavento da Chapada do Araripe conhecida como Cariri cearense apresenta uma vegetação que se mantém verde por quase todo o ano, enquanto que a vegetação predominante das áreas localizadas a sota-vento é a vegetação de caatinga. Já a vegetação da Florestal Nacional do Araripe, que se localiza ao centro da Figura 5.1 em tonalidade vermelha, é uma vegetação de grande porte e bem adensada com boa disponibilidade hídrica. É possível também identificar áreas com solo exposto, com tonalidade esbranquiçada além da variação da densidade da vegetação nativa, indo de uma tonalidade verde escuro (mais densa), a um tom esverdeado claro (menos densa).

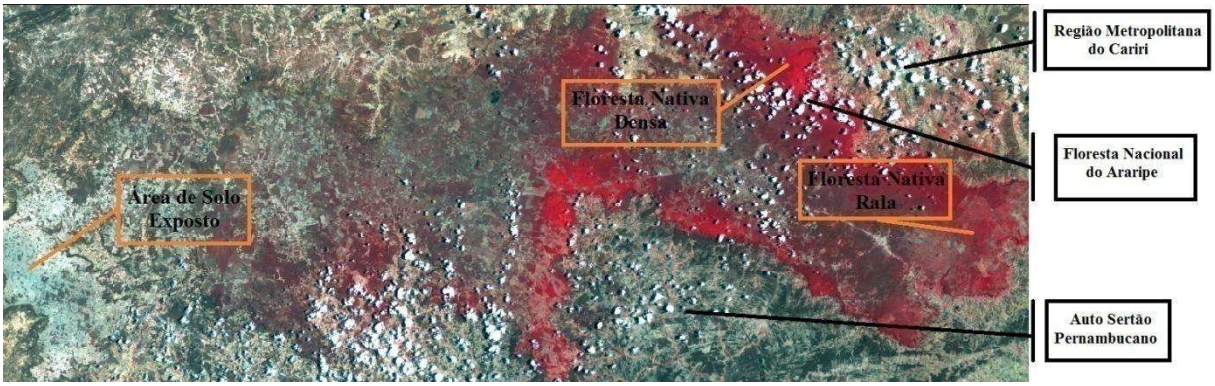

Figura 5.1-Cena estudada em composição RGB para as bandas 4, 3 e 2 Landsat 5-TM.

Neste estudo, os componentes do Balanço Energético e da Bio_Acum foram estimados em valores instantâneos para o momento da passagem do satélite.

Para uma apreciação mais detalhada dos valores de Rn, G, H, LE, Λ, NDVI como também de Bio_acum, foram escolhidos três alvos na cena. Os quais foram: floresta nativa densa, floresta nativa rala e área de solo exposto. Todos estes alvos localizados sobre a Chapada do Araripe.

A cena estudada teve valores de NDVI médio igual a 0,63 apresentando índice de área foliar (IAF) entre 1,20 e 1,45 para áreas de floresta nativa densa. Áreas de floresta nativa rala, no entanto, apresentaram um NDVI em torno de 0,54 e IAF entre 0,87 e 1,02. Já as áreas de solo exposto apresentaram um NDVI aproximadamente de 0,12 com IAF entre 0,01 e 0,02.

5.2 Saldo de Radiação (Rn).

Os valores de Rn foram calculados para condição de céu claro, as 9:45 h (GMT) momento da passagem do satélite Landsat 5.

Nas tabelas subseqüentes (5.1, 5.2 e 5.3), são apresentados o resumo estatístico das áreas selecionadas para análise mais detalhada do comportamento do Rn internamente às referidas áreas. Estas áreas, como já foram mencionadas, são áreas de floresta nativa densa, área de floresta nativa rala e área de solo nu.

Tabela 5.1– Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de floresta nativa densa.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	712,24	712,29	4,51
18/08/2007	803,79	803,94	4,84
21/09/2008	704,96	704,96	5,36
24/09/2009	703,45	703,51	5,29
13/10/2010	675,10	674,72	18,86
29/08/2011	635,85	636,08	5,60

Tabela 5.2– Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de floresta nativa rala.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	672,66	674,99	16,51
18/08/2007	725,20	728,72	23,50
21/09/2008	617,91	621,76	28,25
24/09/2009	608,92	615,94	33,03
13/10/2010	592,71	592,90	29,70
29/08/2011	595,95	600,80	26,35

Tabela 5.3– Resumo estatístico dos resultados do saldo de radiação da área representativa de solo nu.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	575,19	574,05	34,39
18/08/2007	635,62	629,00	33,36
21/09/2008	493,24	483,80	39,76
24/09/2009	471,79	466,88	39,62
13/10/2010	472,64	463,05	30,89
29/08/2011	493,34	494,56	38,27

Nas Figuras 5.2, a 5.7 estão apresentadas as imagens com as configurações espaciais dos valores instantâneos do saldo de radiação a superfície (Rn), no momento da passagem do satélite, nos dias 211, 230, 265, 267, 286, 241, dos anos de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011 respectivamente.

Nas imagens, as áreas com tonalidade verde representam as áreas da superfície com valores de Rn menores que 550 W m^{-2}. Essas áreas foram caracterizadas como áreas de solo exposto ou com vegetação nativa bastante rala, corroborando dessa forma, com valores encontrados por Bezerra (2006) em estudo realizado para mesma área. As áreas com

tonalidade vermelha representam valores de Rn acima de 750 W m^{-2}. Observa-se que esses valores concentram-se na vegetação densa da Chapada do Araripe.

As áreas com tonalidade amarelo escuro (650 W m^{-2} a 700 W m^{-2}) representam as áreas com boa cobertura vegetativa, que envolvem vegetação nativa densa, áreas de pastagens e as áreas utilizadas na prática de agricultura irrigada. As áreas com tonalidade verde claro (550 W m^{-2} a 600 W m^{-2}), são as áreas de vegetação nativa com densidade intermediária.

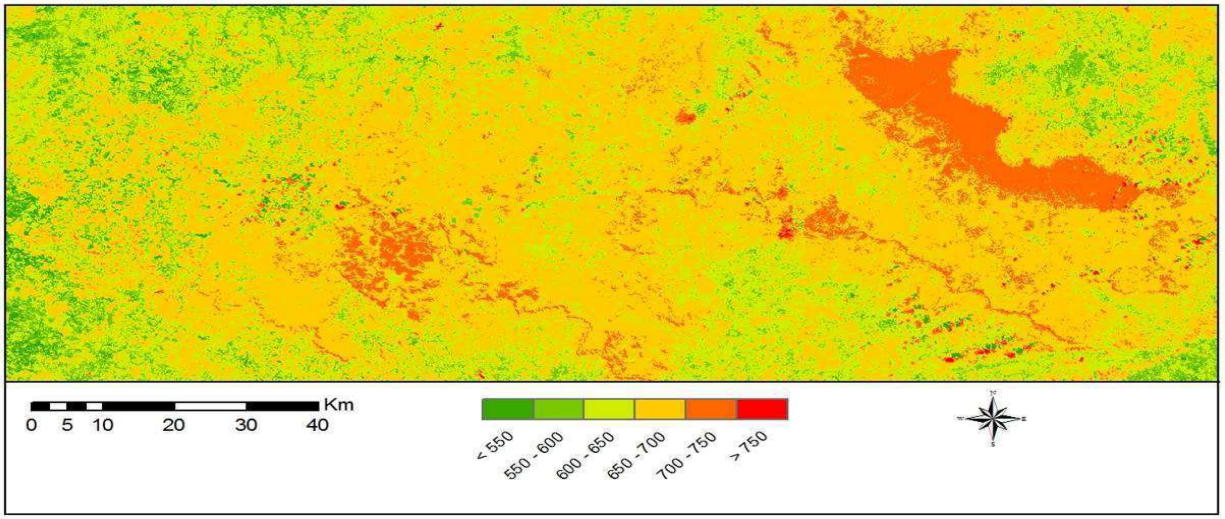

Figura 5.2 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 30/07/2006.

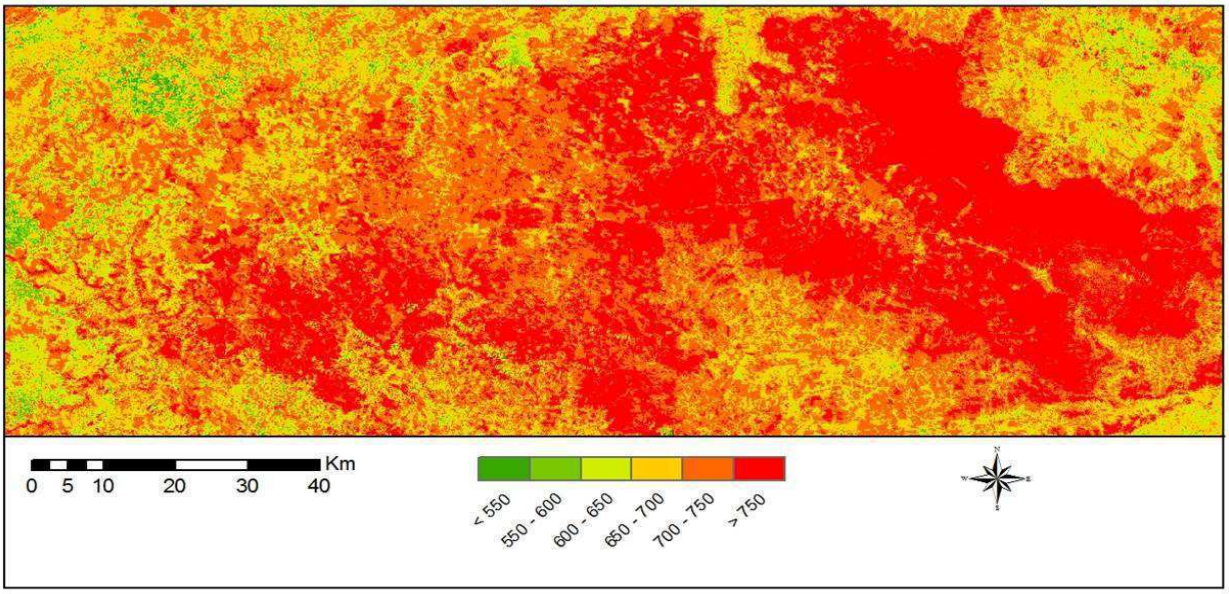

Figura 5.3 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 18/08/2007.

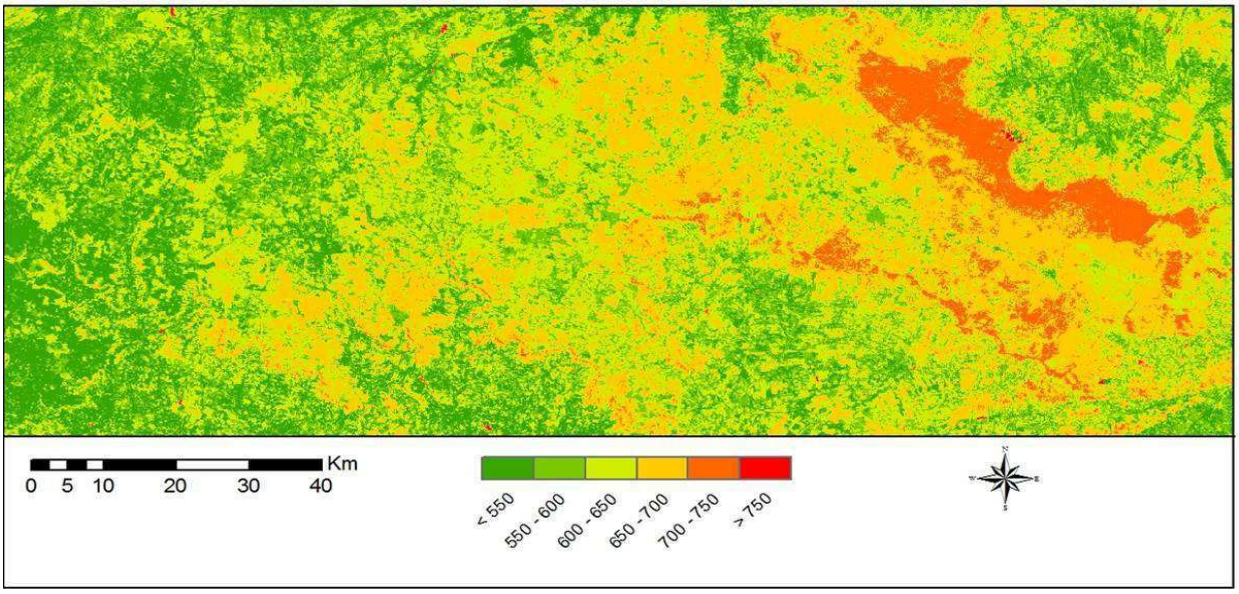

Figura 5.4 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 21/09/2008.

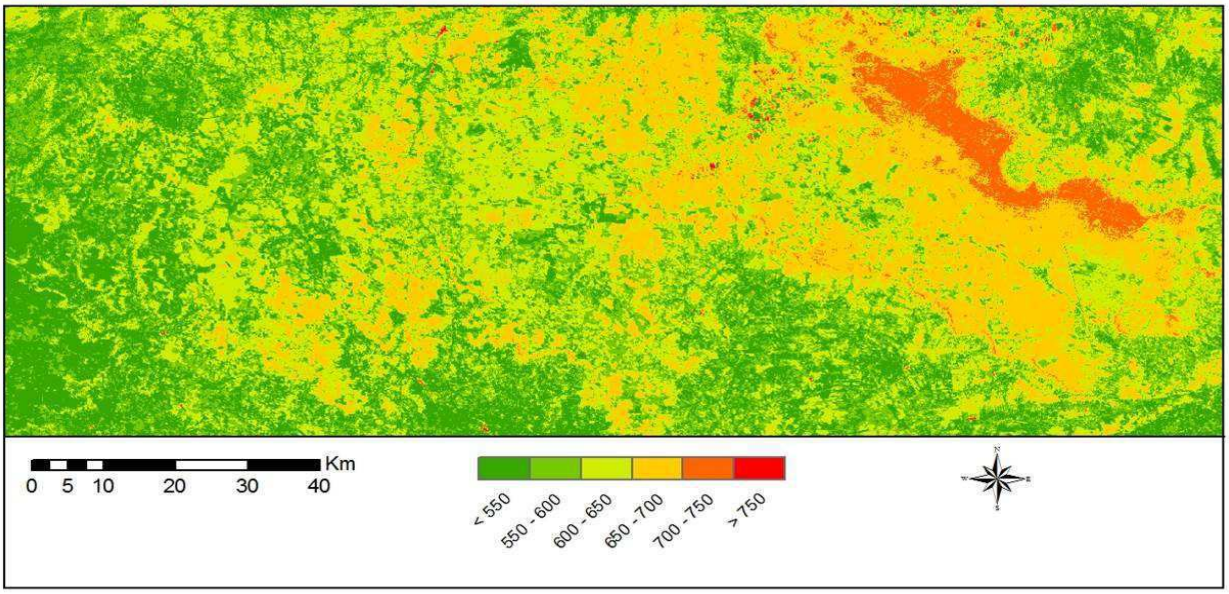

Figura 5.5 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 24/09/2009.

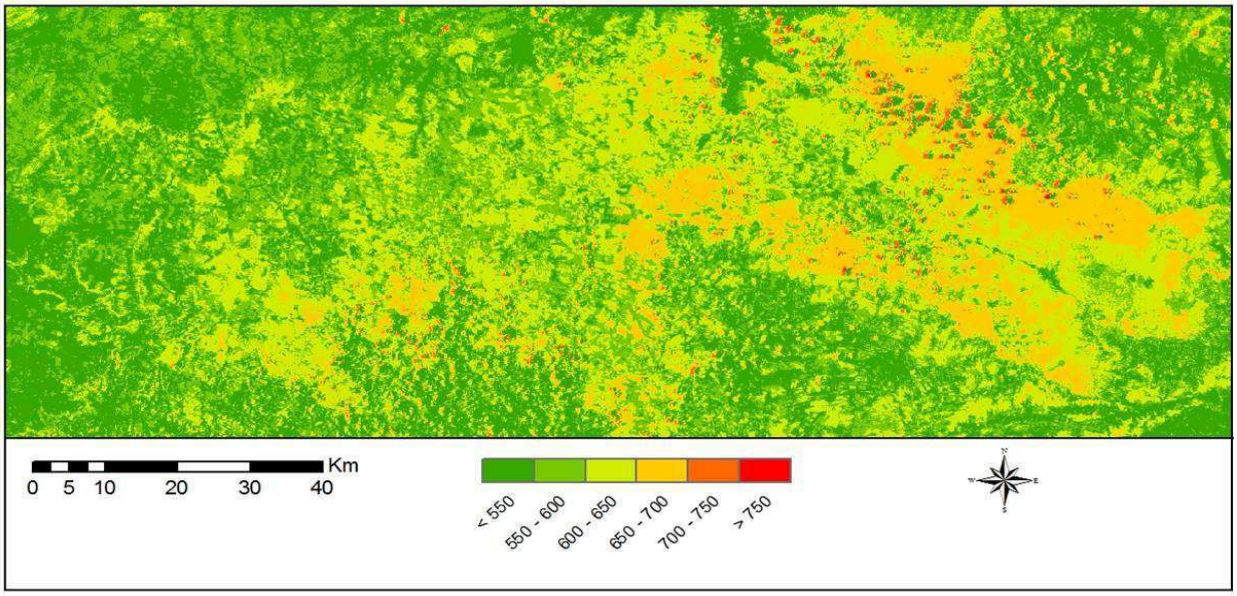

Figura 5.6 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 13/10/2010.

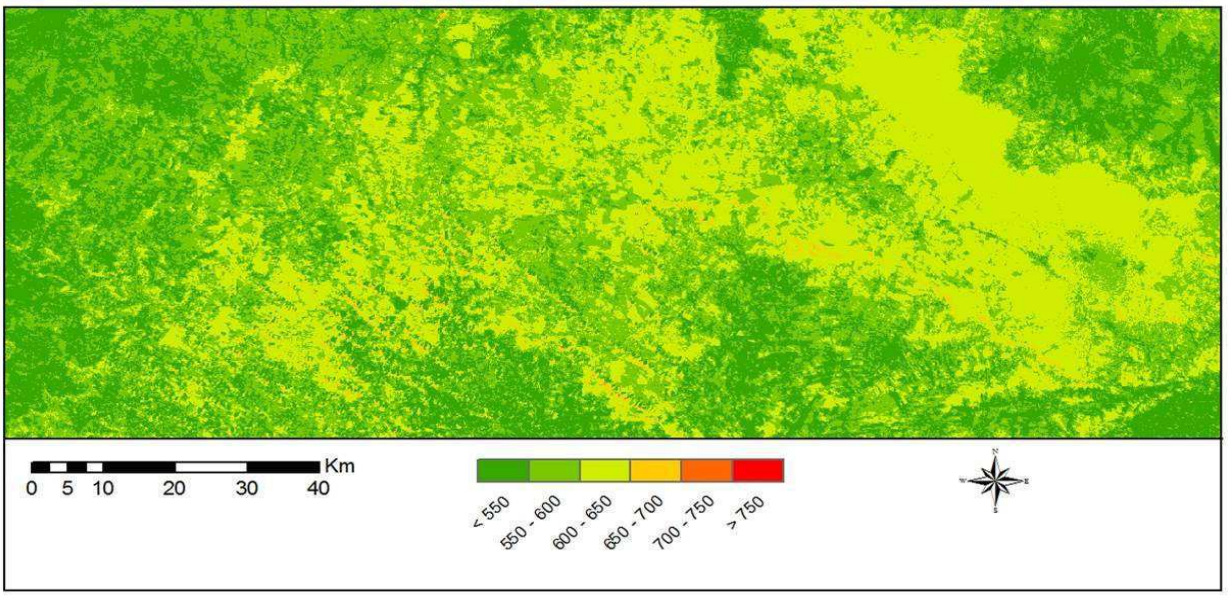

Figura 5.7 – Imagem da densidade de saldo de radiação à superfície (W m^{-2}), data 29/08/2011.

Fazendo uma comparação das seis imagens estudadas é notável o decréscimo nas áreas com saldo de radiação com valores superiores a 750 W m^{-2} ano a ano. Mesmo assim o cenário não sofreu alteração significativas no período estudado, exceto na cena do dia 18/08/2007 (dia 220), apresentando um aumento significativo das áreas com Rn maior que

700 W m^{-2}, este aumento pode ser explicado pela melhor distribuição e acréscimo de 55% na precipitação pluviométrica de toda a área (FUNCEME, 2013). As demais imagens mantiveram seus valores próximos a 650 W m^{-2}.

Analisando o balanço de radiação na Chapada do Araripe, Bezerra (2006), obteve valores superiores a 700 W m^{-2}. Pezzopane et al. (2000) em estudo sobre balanço de radiação no interior de uma floresta estacional semidecidual secundaria no domínio da mata Atlântica observou que um saldo de radiação dentro e fora da floresta variam conforme os dias de céu limpo e nublado. A curva do saldo de radiação no exterior da floresta exibe padrão típico de superfície a céu aberto sendo seu valor máximo em torno de 490 W m^{-2} ao meio dia. Souza Filho et al. (2006) em estudo realizado na Floresta Nacional do Caxiuanã Melgaço – PA. Obteve valores iguais a 622,5 W m^{-2} para dias de céu claro e 331,9 W m^{-2} para dias de céu nublado.

As áreas com vegetação densa se mostram bem homogênea. Tal característica é um forte indicador de que a Floresta Nacional do Araripe possui vegetação bem nutrida e com bom suprimento hídrico. O valor médio de Rn na área de floresta densa variou de 703,45 W m^{-2}, na data 24/09/2009, para 803,79 W m^{-2} na data18/08/2007. Para área de vegetação rala ouve uma variação 592,71 W m^{-2} na data 13/10/2010 e 725,20 W m^{-2} na data 18/08/2007. Já para área de solo nu ouve uma variação nos valores médios de 471,79 W m^{-2} para data 24/09/2009 e 635,62 W m^{-2} na data 18/08/2007. Mesmo assim manteve-se a regularidade nos seus valores em toda a Chapada do Araripe, até mesmo em áreas com avançado estagio de degradação.

5.3 Fluxo de Calor Solo (G).

Segundo Bezerra (2006) o fluxo de calor no solo (G) é o componente do BE que apresenta maior dificuldade em termos de precisão, quando estimado por técnicas de sensoriamento remoto. Em estudos feitos por Feitosa (2005), estimando o balanço de energia a superfície com imagens Landsat 5 TM e NOAA-AVHRR aplicando o SEBAL, o fluxo de calor no solo apresentou os piores resultados entre os componentes do BE, encontrando uma diferença de 25% entre os valores de G estimados e os medidos em superfície. Corroborando com Bastiaanssen et al. (1998), quando visavam a validação do SEBAL. O qual concluía que tal imprecisão não poderia ser considerada um problema, pois os valores de G só têm representatividade para áreas muito pequenas, onde são minimizadas as influências da

variação do tipo de solo e da cobertura vegetativa. Neste estudo, o G foi estimado através da equação empírica proposta por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia. Esta metodologia é em função da temperatura da superfície, do albedo da superfície, do NDVI e do saldo de radiação. Segundo Allen et al. (2002) cerca de 50% do saldo de radiação é destinado ao aquecimento da água. Porem na presente pesquisa considerou-se o valor como sendo igual a 30% conforme Bezerra (2006). O qual salienta ainda que para os lagos da região Nordeste é necessário a condução de estudos específicos visando identificar o percentual representativo.

Nas Figuras 5.8 a 5.13, estão apresentadas as distribuições espaciais de G para os dias 211/2006, 230/2007, 264/2008, 267/2009, 286/2010 e 241/2011 respectivamente, em que as áreas com tonalidade de vermelho representam valores de G maiores que 190 W m^{-2}, que correspondem aos corpos de água existentes na cena. A tonalidade verde claro representa os valores inferiores a 75 W m^{-2} e se distribuem predominantemente na Floresta Nacional do Araripe e em alguns pontos isolados da cena que apresenta vegetação nativa bastante densa ou culturas irrigadas.

Observa-se que as médias não apresentaram discrepâncias significativas entre as datas estudadas, com valores que variaram em torno de 55 W m^{-2} para área de floresta nativa densa, 80 W m^{-2} para área de floresta nativa rala e 85 W m^{-2} para área de solo nu conforme apresentado nas Tabelas subseqüentes de 5.4 a 5.6, onde estão apresentados os respectivos valores de G para as áreas acima citadas.

Nas imagens do dia 24/09/2009, observa-se nitidamente o aumento de áreas com valores de G entre 115 W m^{-2} e 190 W m^{-2}, as quais foram caracterizadas como áreas de solo nu ou áreas com vegetação muito rala. Porém, na imagem do dia 29/08/2011, apresentou uma diminuição de tais áreas, mantendo o padrão médio em torno de 70 W m^{-2}.

Tabela 5.4 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de floresta nativa densa.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	53,28	53,00	3,04
18/08/2007	52,58	52,00	2,80
21/09/2008	44,59	44,00	2,60
24/09/2009	60,28	60,00	3,44
13/10/2010	57,33	56,98	3,11
29/08/2011	47,75	47,00	3,41

Tabela 5.5 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de floresta nativa rala.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	70,97	70,00	5,38
18/08/2007	91,03	90,00	6,30
21/09/2008	80,21	80,00	4,82
24/09/2009	102,33	102,00	6,16
13/10/2010	92,82	92,23	5,84
29/08/2011	62,17	62,00	5,41

Tabela 5.6 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor no solo da área representativa de solo nu.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	95,49	96,00	2,52
18/08/2007	99,60	100,00	2,46
21/09/2008	87,59	88,00	2,59
24/09/2009	114,63	115,00	2,51
13/10/2010	98,25	98,30	2,02
29/08/2011	81,41	8200	2,32

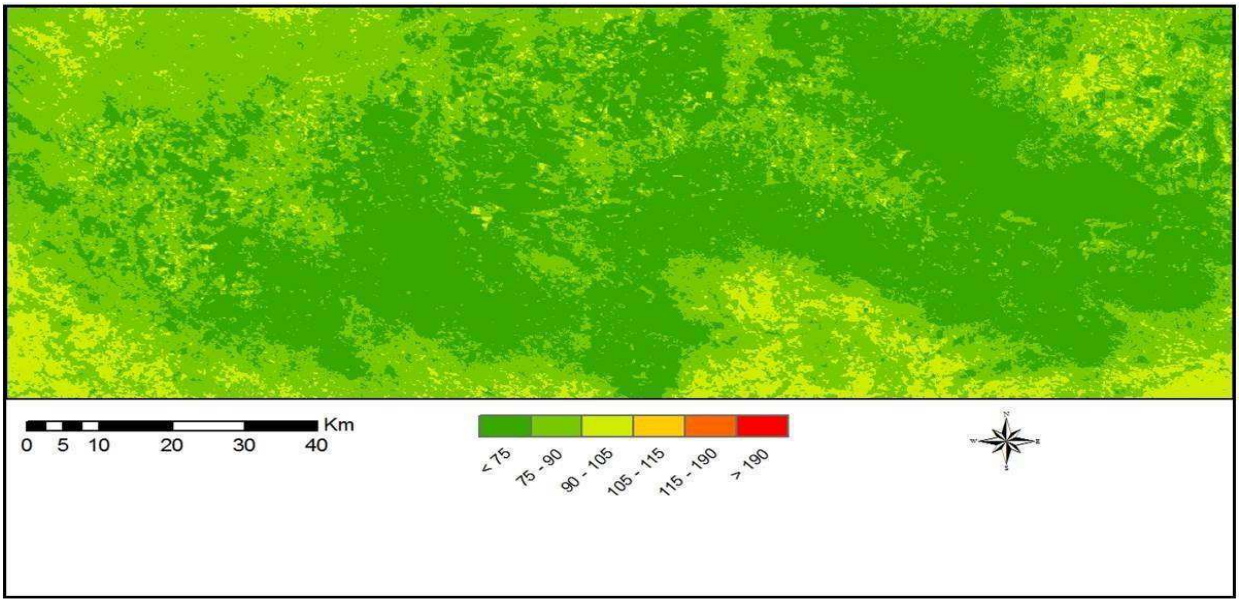

Figura 5.8 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 30/07/2006.

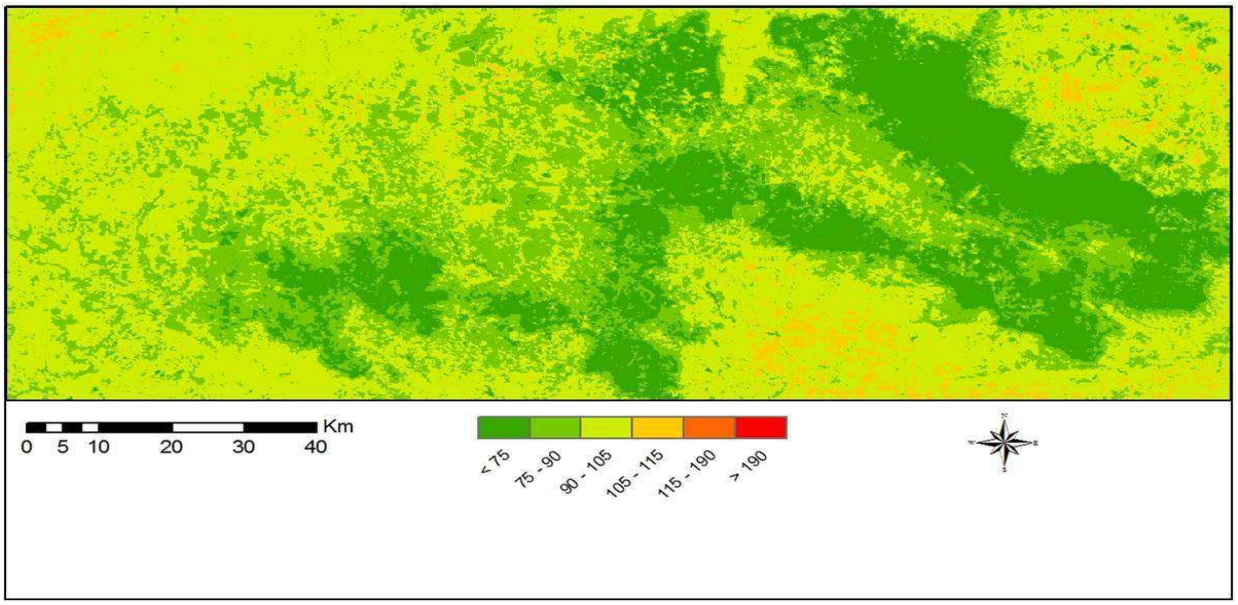

Figura 5.9 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 18/08/2007.

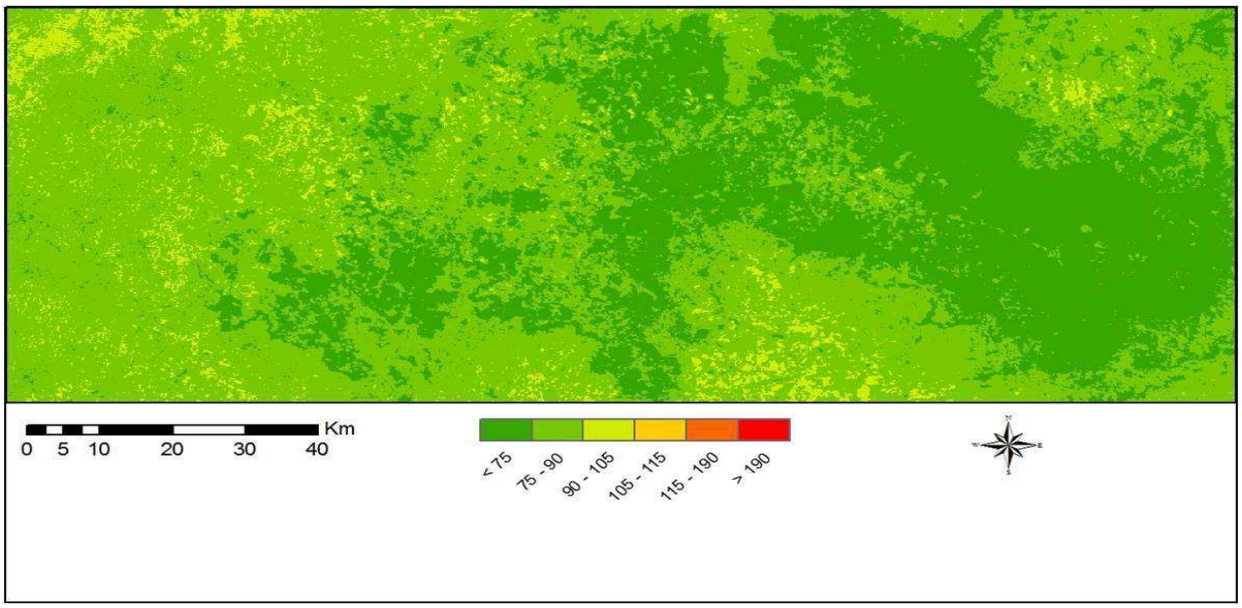

Figura 5.10 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 21/09/2008.

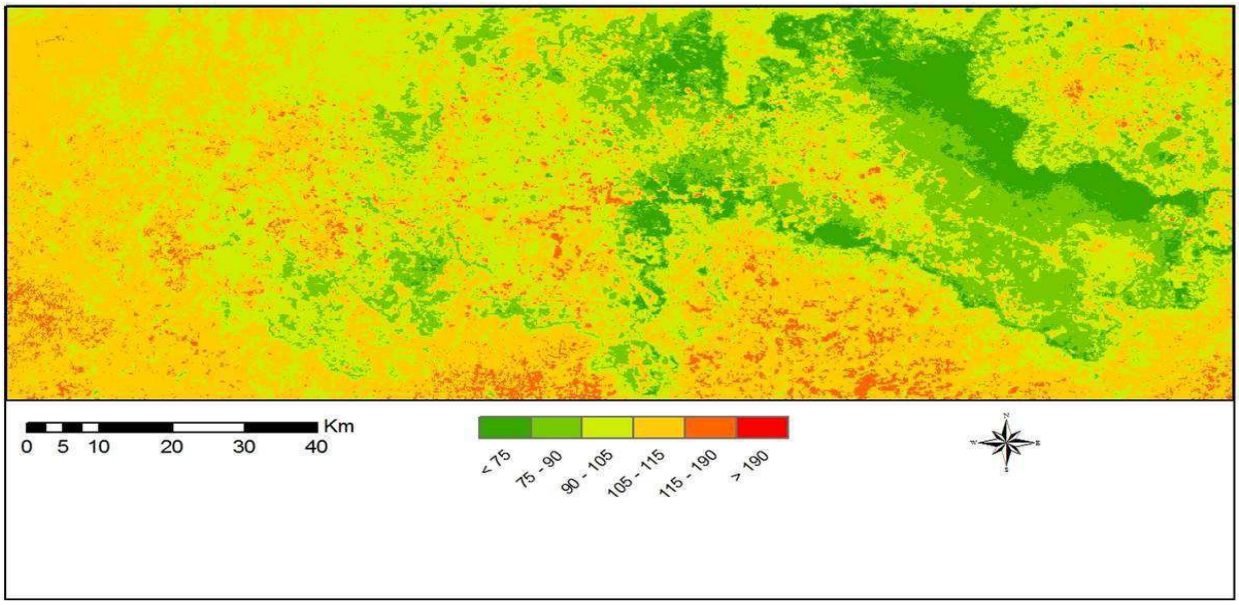

Figura 5.11 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 24/09/2009.

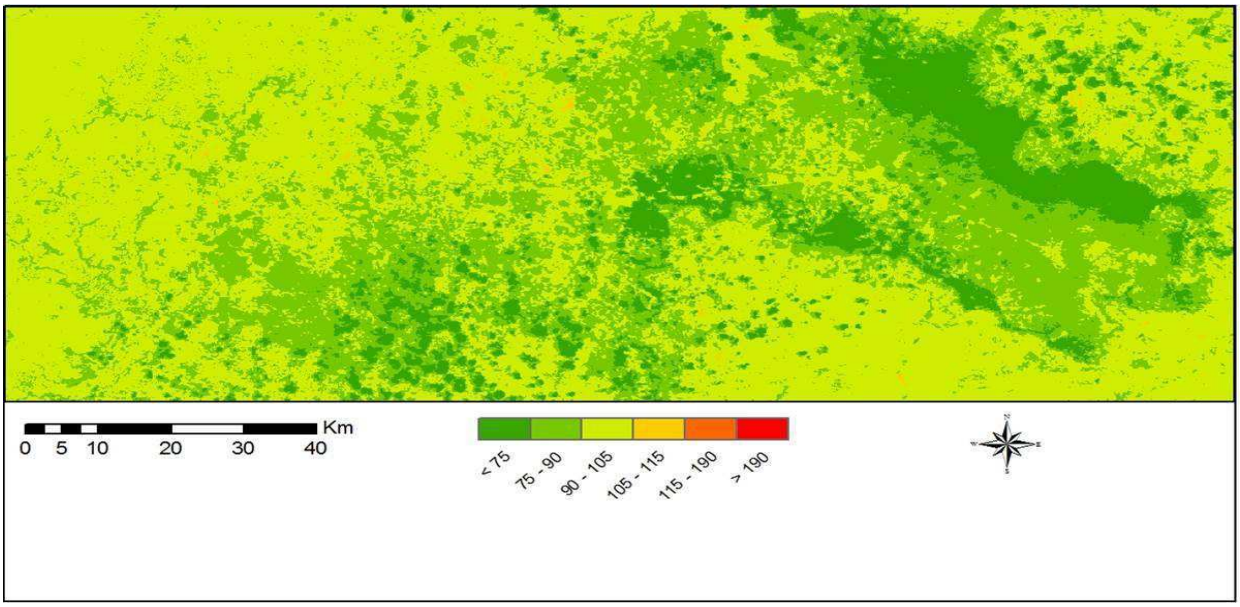

Figura 5.12 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 13/10/2010.

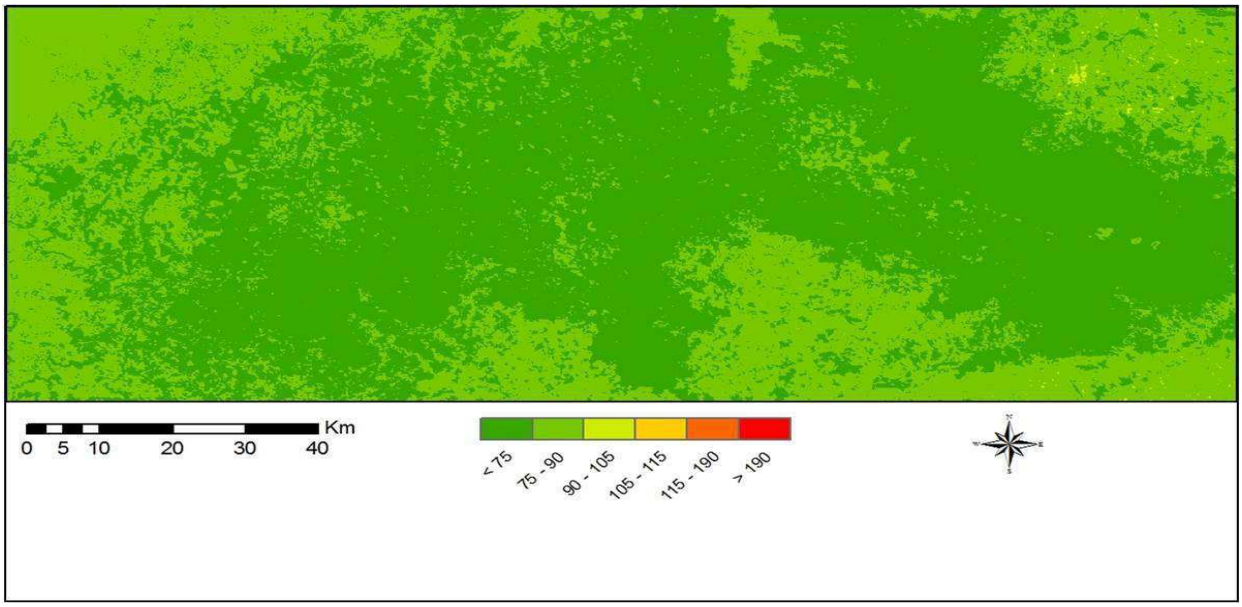

Figura 5.13 – Imagem da densidade de fluxo de calor no solo (G) à superfície, data 29/08/2011.

Os valores médios de G oscilaram entre 44,59W m^{-2} para data 21/09/2008 a 57,33 W m^{-2} para a data 13/10/2010 para área de floresta nativa densa, para área de floresta nativa rala os valores médios de G variou de 62,17 W m^{-2} para a data 29/08/2011 a 102,33 W m^{-2} para a data 24/09/2009 já a área de solo nu teve uma variação de 81,41 W m^{-2} para data 13/10/2010 e 114,63 W m^{-2} para data 24/09/2009. Bezerra (2006), determinando o balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura na mesma cena estudada obteve valores médios próximos a 100 W m^{-2}. Observa-se ainda que os valores de G obtidos para a área de floresta nativa densa correspondem a aproximadamente 11% do saldo de radiação apresentado na mesma área. Corroborando com Bezerra (2006), que encontrou valores de G em torno 10% de Rn em estudo da evapotranspiração para mesma área.

Nas áreas de solo nu o fluxo de calor no solo obtido, apresentou em todos os dias comportamento aproximadamente linear com resultados variando entre 81,41 e 114,63 W m^{-2}.

5.4 Fluxo de Calor Sensível (H).

O cômputo de H através do SEBAL inicia com a escolha de pixels âncoras denominados pixel "quente" e "frio", os quais devem ser escolhidos em áreas que representem situações limites: H máximo no pixel quente e considerado nulo no pixel frio. Para isso o pixel quente deve ser escolhido em área com pouca ou quase nenhuma cobertura

vegetativa e o pixel frio em área de vegetação densa e sem restrição hídrica, com isso, espera-se que registre as maiores evapotranspirações. Na escolha dos referidos pixels, parâmetros da superfície como temperatura da superfície, albedo, índice de vegetação por diferença normalizada, índice de vegetação ajustado ao solo, índice de área foliar e os resultados do saldo de radiação e fluxo de calor no solo, devem ser considerados. Nas tabelas 5.7 a 5.12 são apresentados os valores dos parâmetros citados anteriormente para os pixels escolhidos nesta pesquisa. É notável que o NDVI, que é um índice indicativo da cobertura vegetativa e um bom indicador da biomassa vegetal, no pixel frio apresentou valores oscilando entre 0,56 a 0,66 e para o pixel quente os valor oscilaram entre 0,12 a 0,20.

Tabela 5.7 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 30/07/2006.

Parâmetro	**Pixel Quente**	**Pixel Frio**
Latitude	7° 30’ 17,79” S	7° 17’ 56,59” S
Longitude	40° 42’ 44,43” W	39° 25’ 59,85’ W
T (K)	305,09	295,49
Rn (W m^{-2})	614,33	719,77
G (W m^{-2})	94,0	60,0
Albedo	0,14	0,08
NDVI	0,20	0,62
SAVI	0,07	0,20
IAF	0,05	0,22

Tabela 5.8 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 18/08/2007.

Parâmetro	Pixel Quente	Pixel Frio
Latitude	7° 31’ 26,61” S	7° 18’ 51,80” S
Longitude	40° 39’ 07,54” W	39° 26’ 59,51” W
T (K)	301,24	292,00
Rn (W m^{-2})	583,06	625,68
G (W m^{-2})	94,0	59,0
Albedo	0,27	0,08
NDVI	0,12	0,63
SAVI	0,06	0,21
IAF	0,07	0,22

Tabela 5.9 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 21/09/2008.

Parâmetro	Pixel Quente	Pixel Frio
Latitude	7° 31’04,65” S	7° 18’ 51,86” S
Longitude	40° 42’ 14,81” W	39° 25’ 59,90” W
T (K)	301,67	290,63
Rn (W m^{-2})	568,61	756,68
G (W m^{-2})	91,0	51,0
Albedo	0,25	0,12
NDVI	0,18	0,61
SAVI	0,16	0,49
IAF	0,12	1,22

Tabela 5.10 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 24/09/2009.

Parâmetro	Pixel Quente	Pixel Frio
Latitude	7° 28’ 02,06” S	7° 17’ 22,46” S
Longitude	40° 41’ 40,04” W	39° 28’ 03,28” W
T (K)	315,46	297,46
Rn (W m^{-2})	288,22	683,12
G (W m^{-2})	86,0	63,0
Albedo	0,44	0,12
NDVI	0,16	0,66
SAVI	0,15	0,54
IAF	0,09	1,56

Tabela 5.11 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 13/10/2010.

Parâmetro	Pixel Quente	Pixel Frio
Latitude	7° 30’ 13,92” S	7° 22’ 58,80” S
Longitude	40° 41’ 06,48” W	39° 18’ 15,97” W
T (K)	308,96	295,34
Rn (W m^{-2})	465,10	675,52
G (W m^{-2})	97,0	63,0
Albedo	0,28	0,13
NDVI	0,12	0,59
SAVI	0,11	0,48
IAF	0,02	1,15

Tabela 5.12 – Dados de superfície dos pixels âncoras da data 29/08/2011.

Parâmetro	Pixel Quente	Pixel Frio
Latitude	7° 31’ 22,11” S	7° 23’ 03,03” S
Longitude	40° 40’ 15,65” W	39° 18’ 45,78” W
T (K)	304,46	293,09
Rn (W m^{-2})	493,96	702,40
G (W m^{-2})	90,0	55,0
Albedo	0,28	0,10
NDVI	0,17	0,62
SAVI	0,15	0,48
IAF	0,10	1,14

Para a obtenção dos coeficientes de relação linear da diferença de temperatura do ar próximo [(nível z_1 = 0,1 m) (nível z_2 = 2 m)] a superfície e, através de processo iterativo foram escolhidos “pixels âncoras” como já foi mencionado anteriormente. O computo da diferenças de temperatura (dT) pixel a pixel, foi possível depois de 6 iterações para todas as imagens trabalhadas exceto para a data 29/08/2011, que foi obtido estabilidade dos coeficientes na 5ª interação, conforme as equações:

$$dt_{2006} = -15,42 + 0,69Ts \tag{5.1}$$

$$dt_{2007} = -12,87 + 0,68Ts \tag{5.2}$$

$$dt_{2008} = -9,86 + 0,56Ts \tag{5.3}$$

$$dt_{2009} = -4,40 + 0,18Ts \tag{5.4}$$

$$dt_{2010} = -8,39 + 0,38Ts \quad (5.5)$$

$$dt_{2011} = -9,61 + 0,48Ts \quad (5.6)$$

As figuras 5.14 a 5.19, estão apresentadas as imagens com as configurações espaciais dos valores instantâneos de H para as datas estudadas. Nessas figuras, os valores de H menores que 60 W m^{-2} estão representados pela coloração verde. Nota-se que esses valores concentram-se predominantemente na Floresta Nacional do Araripe, que conforme já foi mencionado, trata-se de uma floresta nativa densa. As áreas com H superior a 350 W m^{-2}, estão representadas pela cor vermelho escuro e se encontram distribuídos nos arredores bem como em pontos isolados sobre a chapada. Esses pontos provavelmente representam áreas com pouca ou quase nenhuma cobertura vegetativa, pois corroboram com valores obtidos por Bezerra (2004) para áreas de solo exposto no dia 04/12/2004. Ainda nas referidas imagens, as áreas com H entre 60 W m^{-2} e 120 W m^{-2} estão representadas pela cor verde claro e concentram-se em pontos isolados sobre a Chapada do Araripe. As áreas com tonalidade amarela representam áreas com valores entre 120 W m^{-2} e 180 W m^{-2}. Já as áreas em laranja representam valores entre 180 W m^{-2} e 250 W m^{-2}.

O resumo estatístico do fluxo de calor sensível para as áreas estudadas são apresentados nas tabelas de 5.13 a 5.15.

Tabela 5.13 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com vegetação nativa densa.

Data	**Media (Wm^{-2})**	**Mediana (Wm^{-2})**	**Desvio Padrão (Wm^{-2})**
30/07/2006	102,54	100.11	14,63
18/08/2007	115,42	114,80	16,20
21/09/2008	112,82	112,01	18,61
24/09/2009	106,30	104,02	20,54
13/10/2010	112,30	110,76	17,58
29/08/2011	138,31	134,40	13,70

Tabela 5.14 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com vegetação nativa rala.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	161,29	152,14	59,30
18/08/2007	262,30	243,08	106,95
21/09/2008	260,74	237,57	97,67
24/09/2009	221,03	199,98	81,64
13/10/2010	280,20	278,93	44,25
29/08/2011	207,65	202,51	41,33

Tabela 5.15 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor sensível (H) para áreas com solo nu.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	446,58	451,29	33,21
18/08/2007	390,44	406,63	69,55
21/09/2008	400,23	394,51	34,64
24/09/2009	336,56	340,79	36,09
13/10/2010	361,57	361,36	18,08
29/08/2011	356,77	360,80	26,03

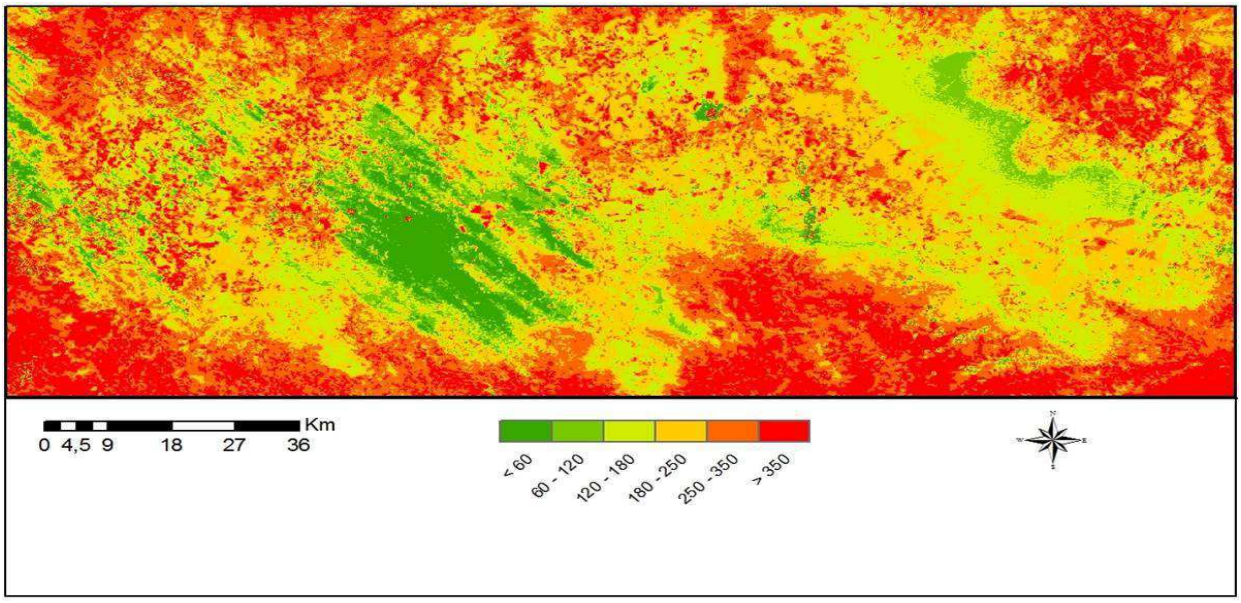

Figura 5.14 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 30/07/2006.

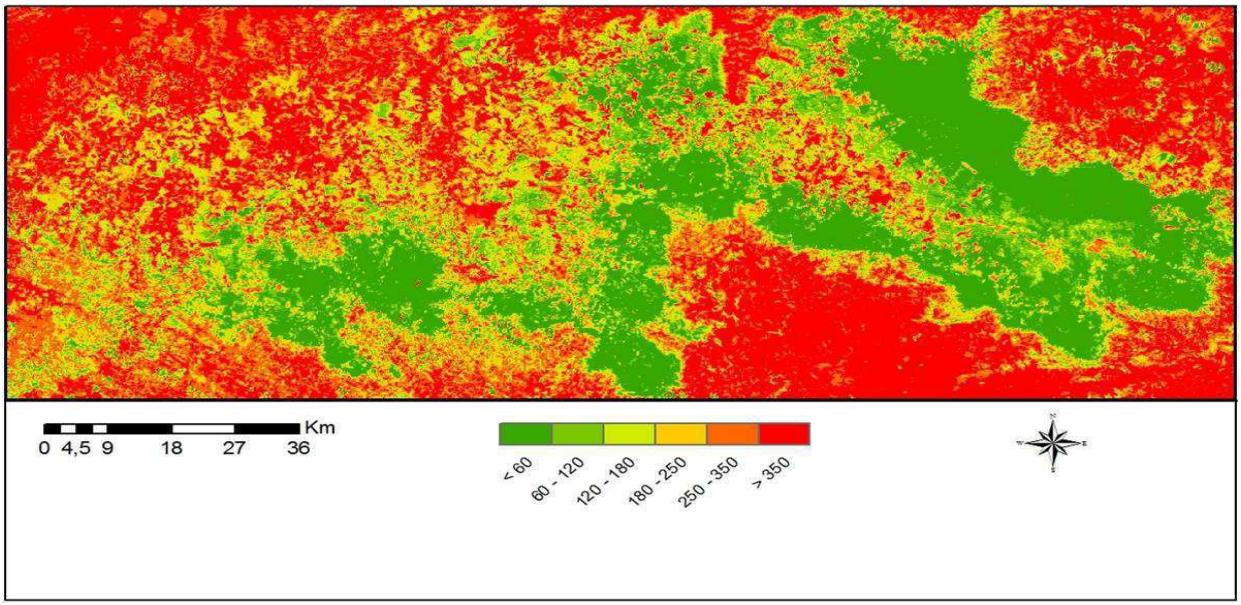

Figura 5.15 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 18/08/2007.

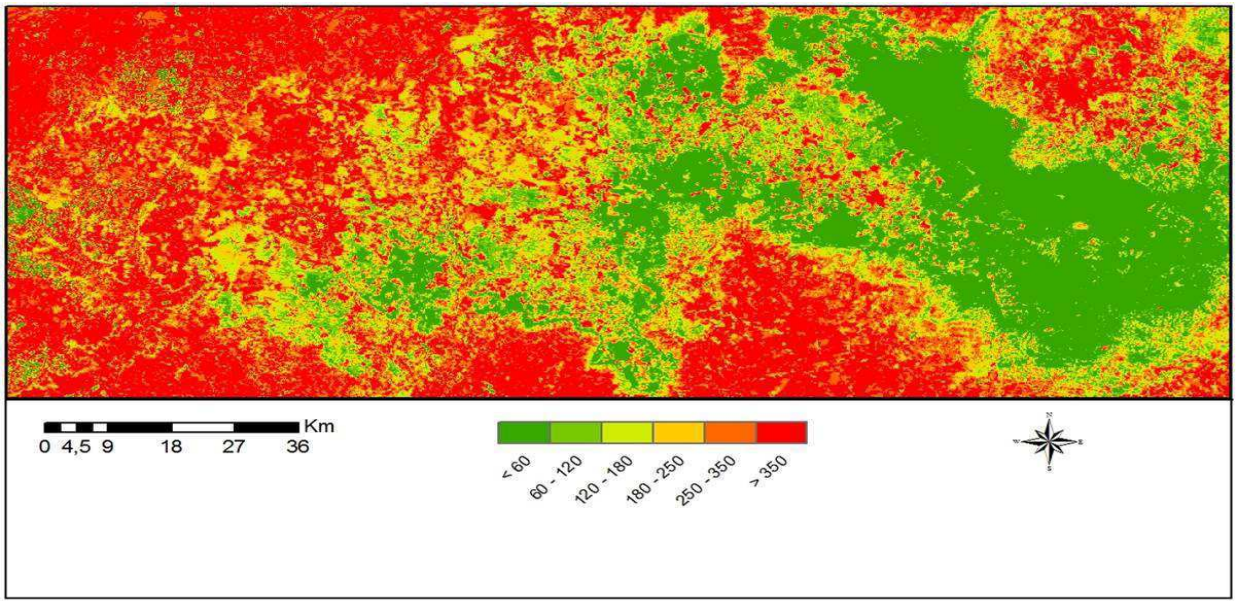

Figura 5.16 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 21/09/2008.

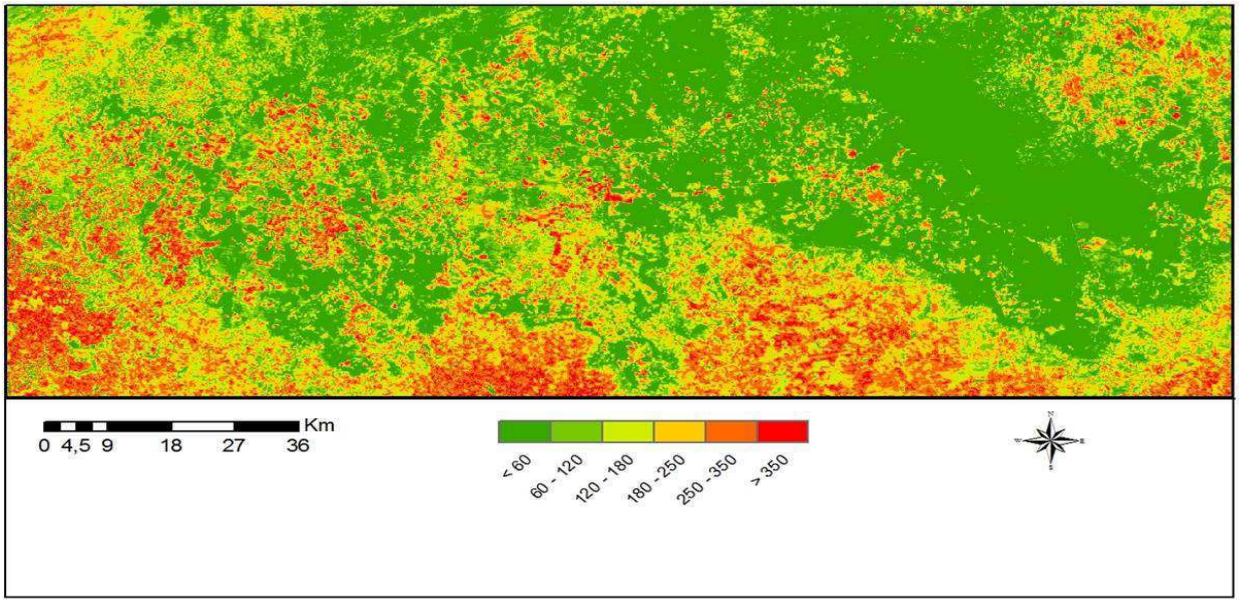

Figura 5.17 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 24/09/2009.

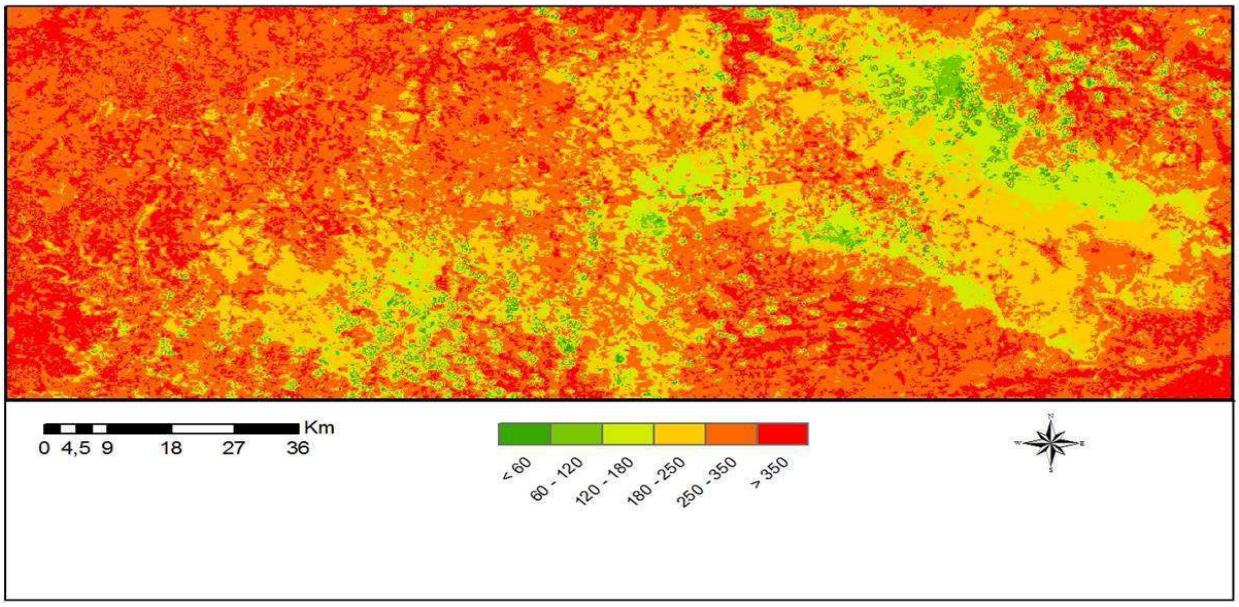

Figura 5.18 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 13/10/2010.

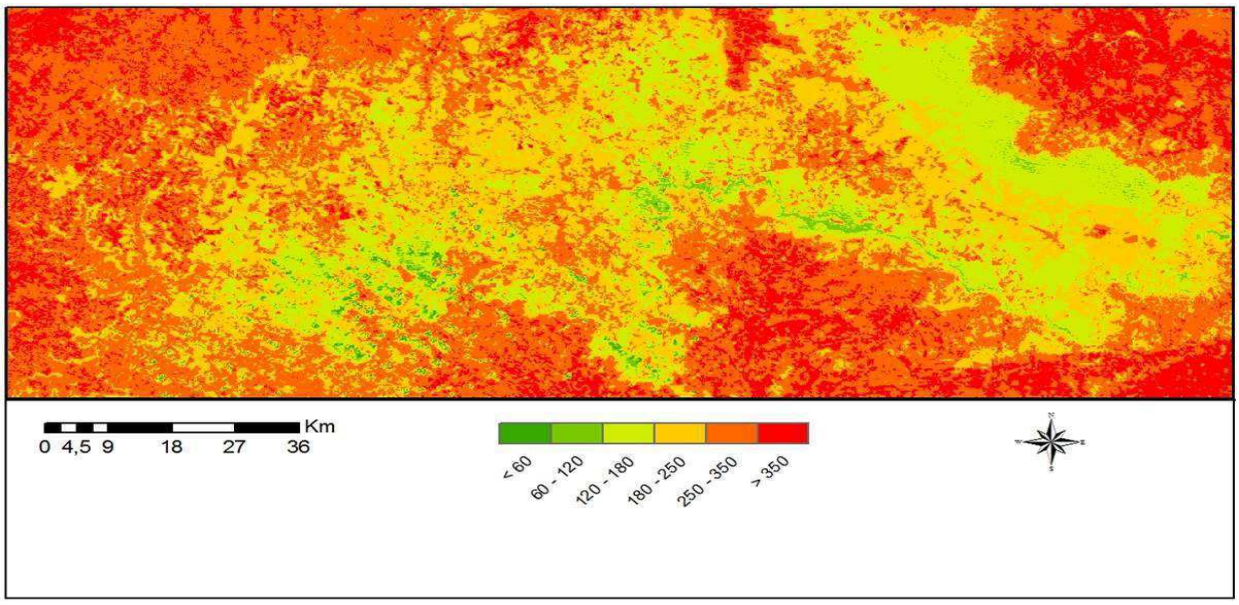

Figura 5.19 – Imagem da densidade de fluxo de calor sensível (H) à superfície, data 29/08/2011.

Os valores médios de H oscilaram entre 102,54W m^{-2} para data 30/07/2006 a 115,42 W m^{-2} para a data 18/08/2007 para área de floresta nativa densa, para área de floresta nativa rala os valores médios de G variou de 161,297 W m^{-2} para a data 30/07/2006 a 280,20 W m^{-2} para a data 13/10/2010 já a área de solo nu teve uma variação de 336,56 W m^{-2} para data

24/09/2009 e 446,58 W m^{-2} para data 30/07/2006. Bastiaanssen et al. (1998) obtiveram valores em torno de 80 W m^{-2} para região de oásis. Ávila et al. (2010), em estudo sobre estimativa dos fluxos de calor sensível e latente na floresta através do método do gradiente no município de Melgaço - PA, no interior da floresta de Caxiuanã, obteve os seguintes resultados: o fluxo máximo de calor sensível foi 92 W m^{-2} as 15:00 horas. Ainda segundo os autores durante a noite esses fluxos são mais negativos, indicando que na camada de 15 a 21 m ocorreu mais resfriamento. O fluxo mínimo de calor sensível foi -24,3 W m^{-2}, entretanto, por volta das 8 h com a incidência direta da radiação há um aumento rápido do H devido a esta camada estar próxima ao topo do dossel da vegetação. O valor máximo do fluxo de calor sensível foi de 104,5 W m^{-2}. Os autores salientam ainda que nesta camada grande parte da energia é utilizada para o processo de evapotranspiração.

5.5 Fluxo de Calor Latente (LE).

As Figuras 5.20 a 5.26 apresentam as imagens do fluxo de calor latente para a cena de estudo, para as datas 30/07/2006, 18/08/2007, 21/09/2008, 24/09/2009, 13/10/2010 e 29/08/2011. Nas Tabelas de 5.16 a 5.18 estão representados os dados estatísticos das imagens de LE. Nas referidas figuras as áreas na cor verde escuro representam valores de LE menores que 125 W m^{-2}. Estes valores representam as áreas de solo nu ou com pouca cobertura vegetal. As áreas verde representam valores de LE entre 125 W m^{-2} e 220 W m^{-2}, enquanto que as áreas com cor verde claro representam valores entre 220 W m^{-2} e 300 W m^{-2} e amarelo entre 300 W m^{-2} e 400 W m^{-2}. É nitidamente notável que as áreas com esses valores são predominantes na cena estudada para todas as datas, o que comprova tratar-se de valores de vegetação nativa.

As áreas com valores de LE acima de 620 W m^{-2} estão representadas pela cor vermelho escuro. Esses valores se concentram predominantemente nas áreas de floresta nativa densa da Chapada do Araripe, bem como as áreas com LE entre 400 W m^{-2} e 520 W m^{-2} estão representadas pela cor laranja e as áreas com cor vermelho representam valores de LE entre 520 W m^{-2} e 620 W m^{-2}. Esses valores se distribuem em pontos da Chapada do Araripe e em alguns pontos isolados nos seus arredores representando vegetação com boa disponibilidade hídrica (floresta úmida) alem dos espelhos d'água existentes na cena. Aguiar et al. (2006) encontraram média diária do fluxo de calor latente de 115,5 W m^{-2} no período chuvoso e de 92,9 W m^{-2} no período menos chuvoso no sítio experimental da Reserva Biológica do Rio

Jaru, localizado a Leste do Estado de Rondônia. Dantas (2010) em estudo dos fluxos de calor sensível e latente armazenados no dossel vegetativo e análise de infiltração de água no solo em floresta tropical, afirma que o fluxo de calor latente armazenado pela floresta é praticamente constante até próximo ao meio dia, com valor médio de -11,19 W m^{-2}. Após o meio dia com o aumento da disponibilidade de energia, ocorre um aumento significativo de calor latente armazenado pelo dossel da floresta, chegando a valores superiores a 20 W m^{-2}, às 16h 30min.

Tabela 5.16 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de floresta nativa densa.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	556,41	560,48	17,05
18/08/2007	751,19	751,68	6,58
21/09/2008	660,41	660,91	6,30
24/09/2009	643,16	643,50	6,75
13/10/2010	506,44	505,62	22,96
29/08/2011	449,79	453,19	18,25

Tabela 5.17 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de floresta nativa rala.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	440,68	454,57	75,51
18/08/2007	373,14	395,36	130,84
21/09/2008	289,56	308,27	110,96
24/09/2009	393,69	416,25	107,25
13/10/2010	223,10	221,80	104,80
29/08/2011	325,03	338,32	66,44

Tabela 5.18 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo de calor latente (LE) para a área de solo nu.

Data	Media (Wm^{-2})	Mediana (Wm^{-2})	Desvio Padrão (Wm^{-2})
30/07/2006	84,70	71,04	64,26
18/08/2007	150,99	138,35	86,34
21/09/2008	163,72	120,03	131,33
24/09/2009	126,12	96,37	98,79
13/10/2010	67,43	54,49	53,93
29/08/2011	82,99	77,48	52,11

Nas imagens a seguir é notável a presença de duas modas. A primeira, em torno de 400 W m^{-2}, correspondendo aos valores de LE para a área de floresta nativa rala representada pela cor laranja, enquanto que a segunda, em torno de 650 W m^{-2}, devido aos elevados valores de LE para a área de floresta nativa densa (floresta úmida) que está represetada pela cor vermelha.

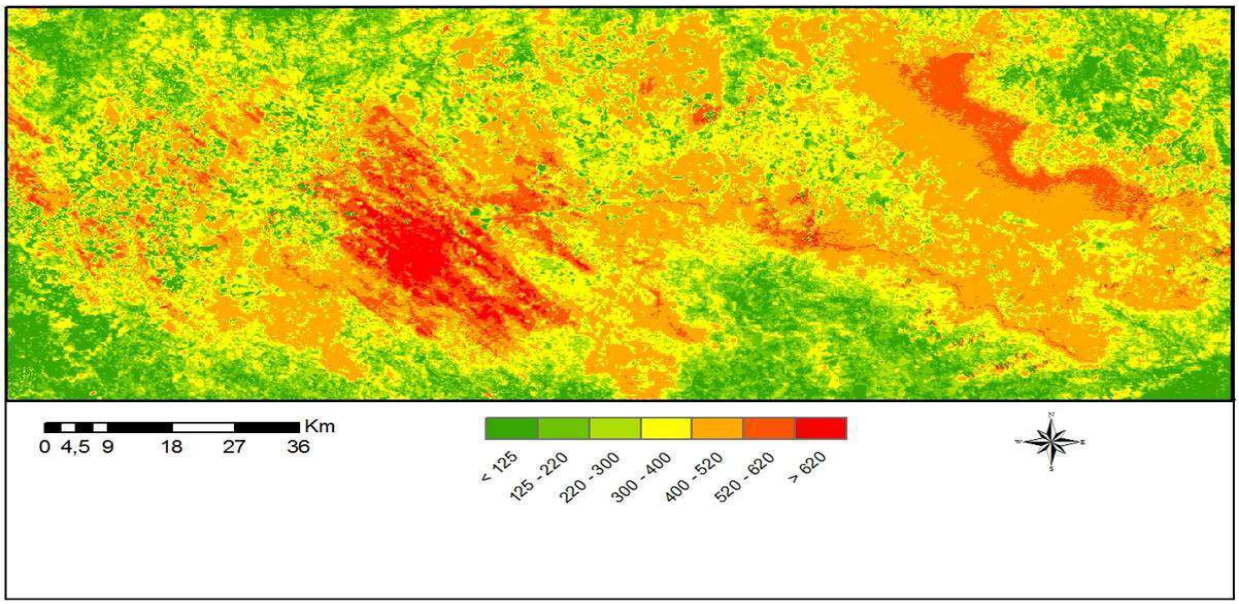

Figura 5.20 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 30/07/2006.

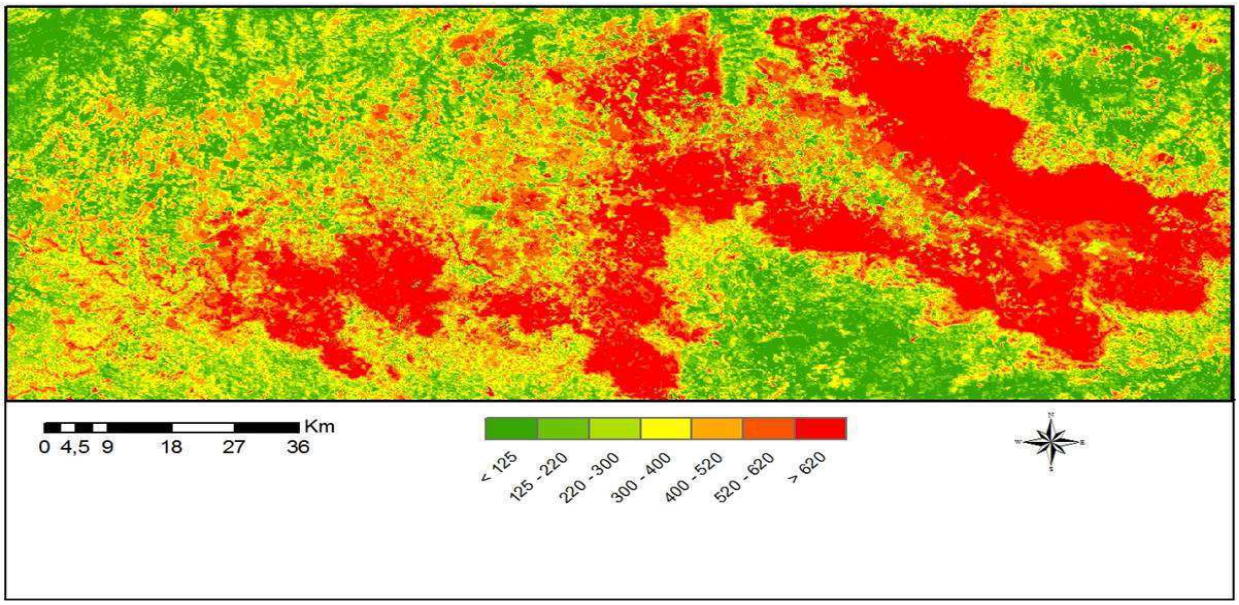

Figura 5.21 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 18/08/2007.

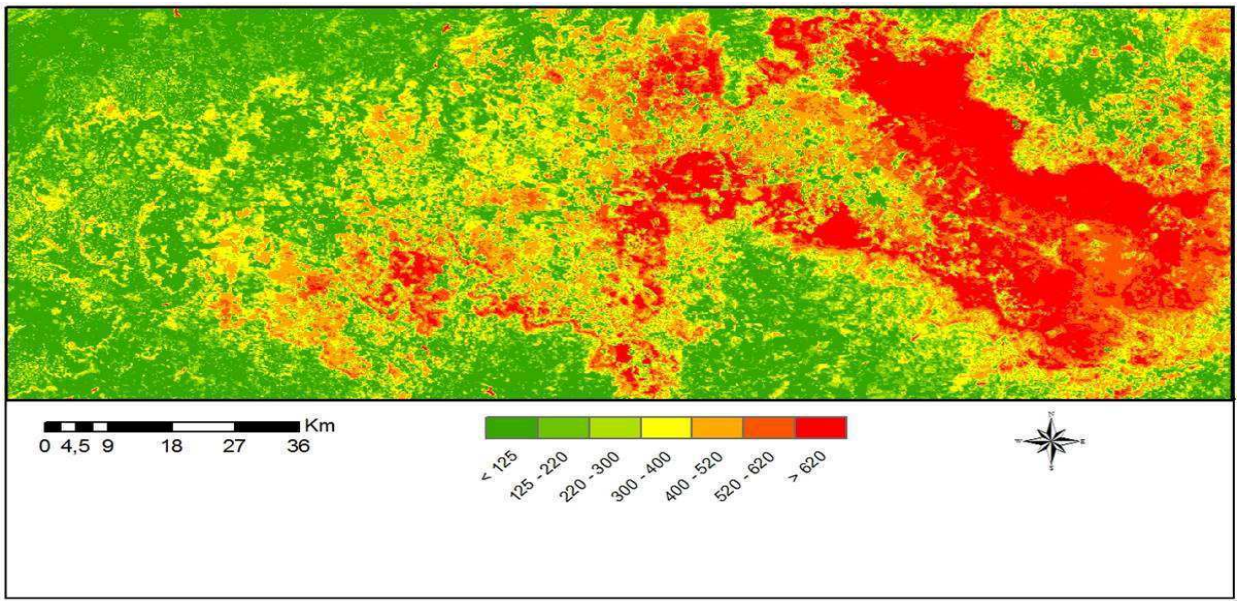

Figura 5.22 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 21/09/2008.

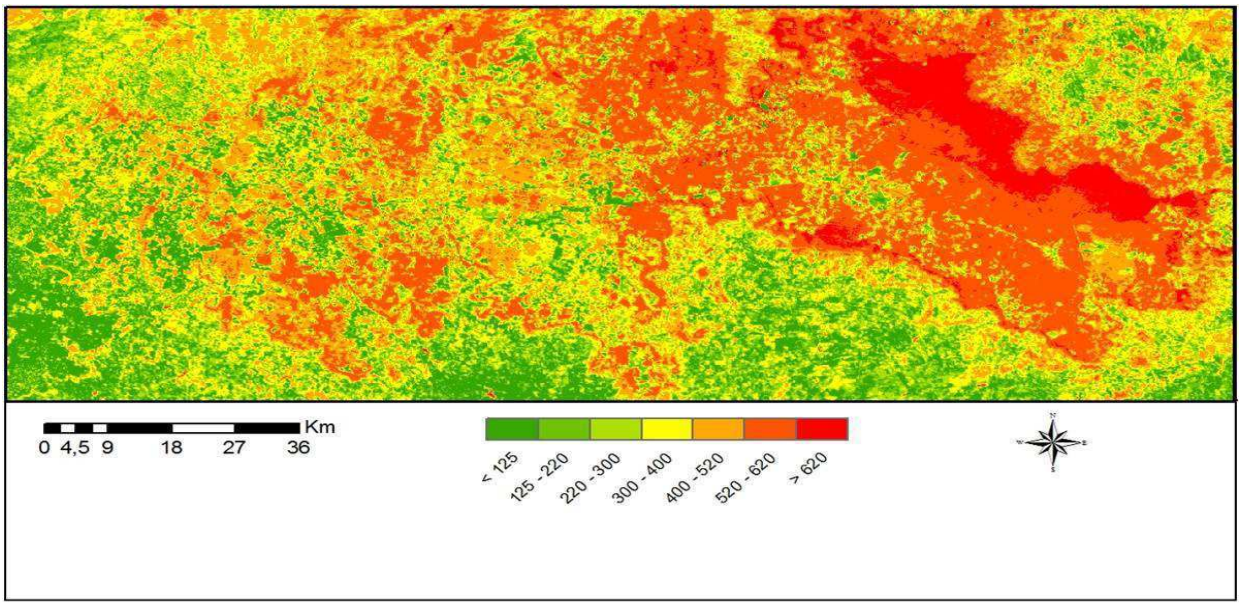

Figura 5.23 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 24/09/2009.

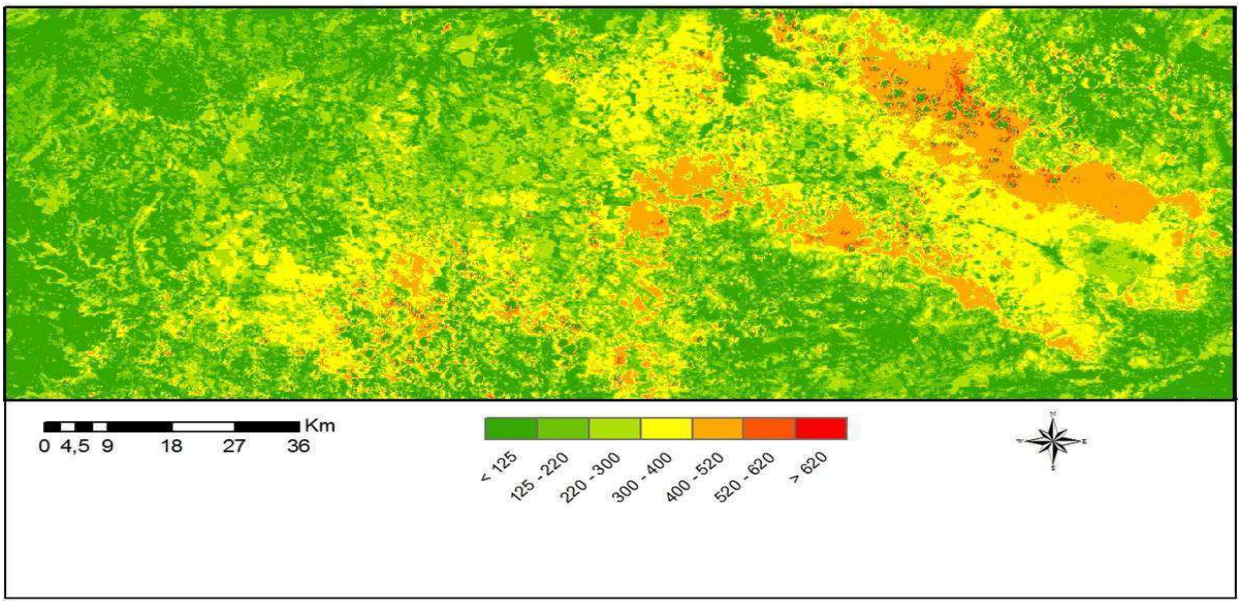

Figura 5.24 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 13/10/2010.

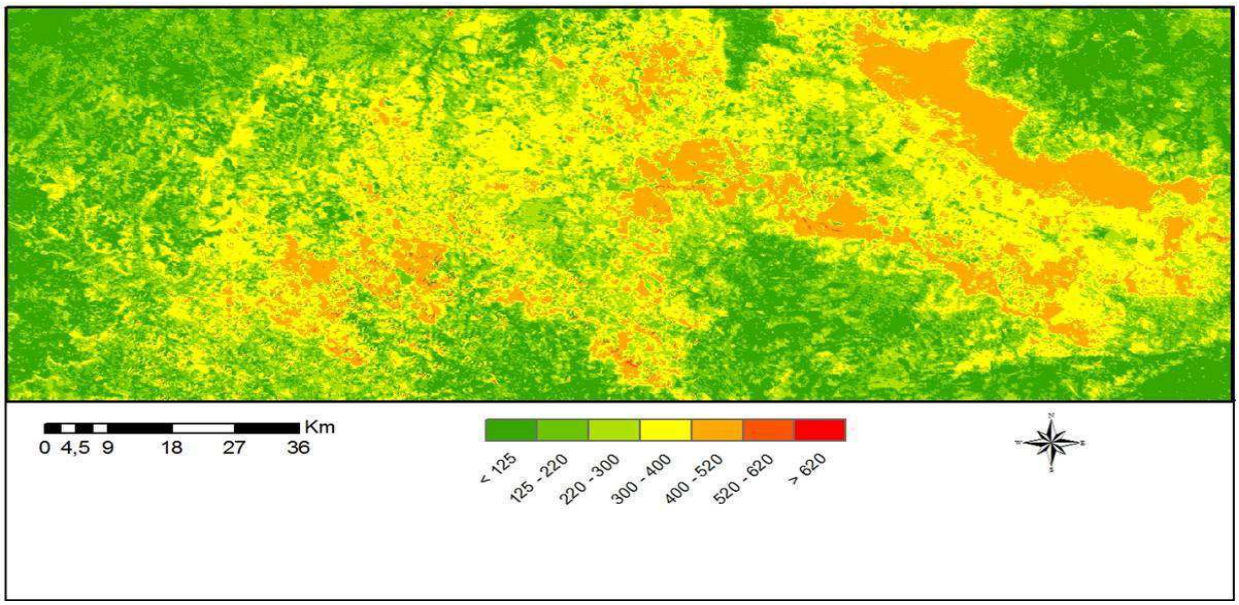

Figura 5.25 – Imagem da densidade de fluxo de calor latente (LE) à superfície, data 29/08/2011.

Bezerra (2006) determinando o balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL obteve resultados de LE para a vegetação nativa densa em torno 350 W m^{-2}. Já para área de vegetação nativa rala apresentou valores inferiores a 100 W m^{-2}, para todos os dias estudados.

Bastiaanssen (2000) em estudo na Turquia obteve valores LE de 535,4 W m^{-2} para áreas de vegetação densa. Hemakumara et al. (2003) em estudo no Sri Lanka, aplicaram o SEBAL a imagens de NOAA em área de vegetação bastante heterogênea composta zonas úmidas, vegetação arbórea e áreas de solo nu, e estimaram médias diárias de fluxos de energia para um período de dez dias obteve 91 W m^{-2} para o período de 04 a 15 de dezembro de 1999 e 120 W m^{-2} para o período de 01 a 10 de janeiro de 2000.

5.6 Fração Evaporativa (Λ).

Apesar de ser diretamente relacionada com a razão de Bowen (β), a fração evaporativa (Λ) tem normalmente apresentado uma pequena variação diurna, (SANTOS, 2010). Esta variação da Λ pode ser percebida através da sua relação com as condições atmosféricas e com as características da superfície.

No presente estudo os valores médios para a área de floresta nativa densa variou entre 0,76 para data 29/08/2011 e 1,0 para as datas 18/08/2007, 21/08/2008 e 24/09/2009. Nas Tabelas 5.19, 5.20 e 5.21 são apresentados os resumos estatísticos para Λ da área de floresta

nativa densa, floresta nativa rala e para solo nu respectivamente. É notável que os valores dos desvios padronizados da Λ para as imagens estudadas apresentam valores muito próximos, em torno de 0 para as áreas de floresta nativa densa (onde a evapotranspiração é máxima), para as áreas de floresta nativa rala os valores dos desvios padronizados oscilaram em torno de 0,15, corroborando com Farah et al. (2004) e indicando que a nebulosidade não está relacionado com a estabilidade da Λ. Segundo Santos (2010), os efeitos das nuvens no ciclo diurno da Λ têm sido estudados, no entanto, não existe consenso na literatura.

Tabela 5.19 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de floresta nativa densa.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,84	0,85	0,0
18/08/2007	1,00	0,99	0,0
21/09/2008	1,00	1,00	0,0
24/09/2009	0,78	0,79	0,0
13/10/2010	0,82	0,82	0,0
29/08/2011	0,86	0,87	0,0

Tabela 5.20 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de floresta nativa rala.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,73	0,75	0,11
18/08/2007	0,58	0,62	0,19
21/09/2008	0,53	0,57	0,19
24/09/2009	0,76	0,80	0,18
13/10/2010	0,38	0,44	0,19
29/08/2011	0,61	0,62	0,10

Tabela 5.21 – Resumo estatístico dos resultados do fluxo da fração evaporativa para área de solo nu.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,16	0,14	0,13
18/08/2007	0,28	0,25	0,15
21/09/2008	0,42	0,25	0,39
24/09/2009	0,34	0,23	0,31
13/10/2010	0,15	0,13	0,11
29/08/2011	0,18	0,18	0,11

No entanto a variabilidade diurna da Λ é um fenômeno complexo e que outros fatores podem exercer influências na variação da Λ, que deve ser analisada cuidadosamente.

Nas figuras de 5.26 a 5.30 são apresentadas as imagens da Λ e de seus respectivos histogramas de frequência.

Nas imagens, as áreas com tonalidade azul escuro representam as áreas da superfície com valores da Λ variando entre 0,8 e 1,0. Essas áreas são caracterizadas como áreas de floresta nativa densa, a qual possui boa disponibilidade hídrica, corroborando dessa forma, com valores encontrados por Brandão et al. (2006) em estudo realizado para mesma área. As áreas com tonalidade azul representam valores da Λ de 0,6 a 0,8. Atribui-se esses valores a áreas de vegetação nativa rala (vegetação do tipo cerradão) a qual é predominante na chapada do Araripe.

As áreas com valores entre 0,4 e 0,6 apresentadas por uma tonalidade azul claro representam as áreas de vegetação arbustiva, com densidade intermediária. As áreas em azul claro (0,2 a 0,4) são as áreas de vegetação rala, e de agricultura de subsistência. Predominantes nas encostas da Chapada. Já as áreas em azul esbranquiçado (0,0 a 0,2), representam as áreas com quase ou nenhuma vegetação (solo nu) como também a vegetação de caatinga, predominante no alto sertão Pernambucano (parte inferior da imagem).

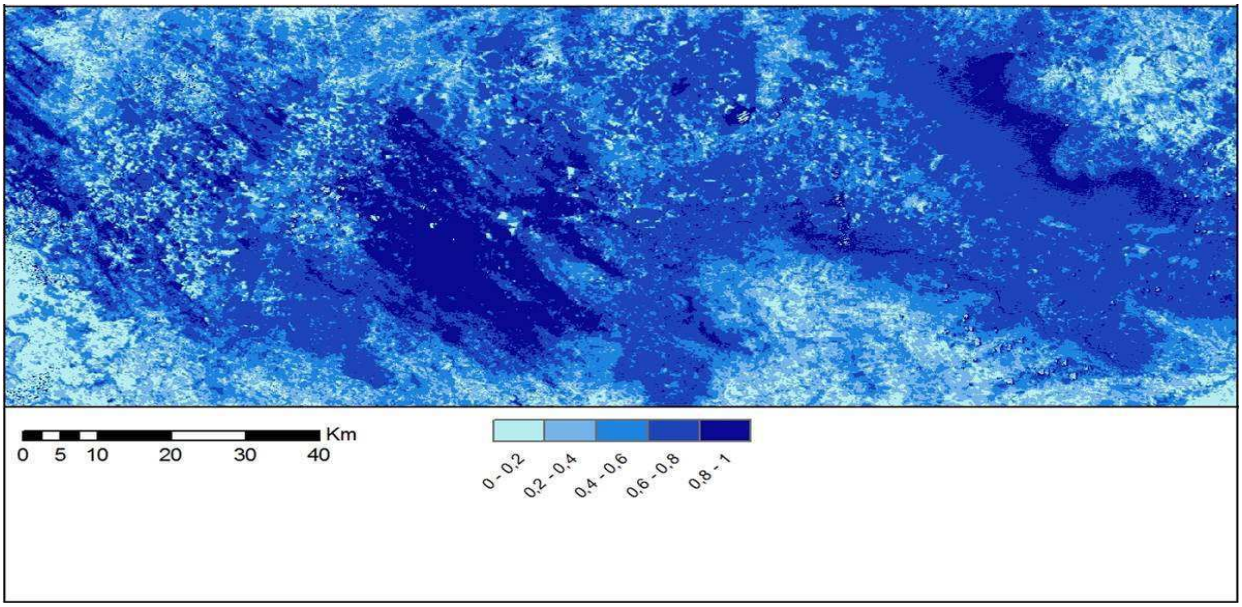

Figura 5.26 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 30/07/2006.

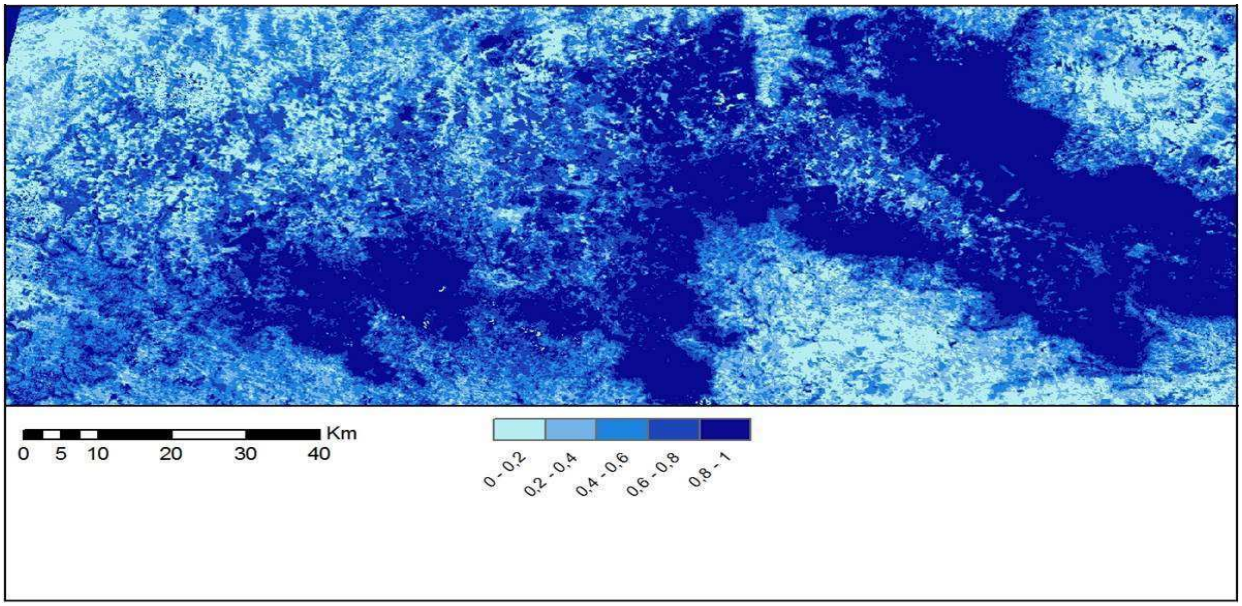

Figura 5.27 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 18/08/2007.

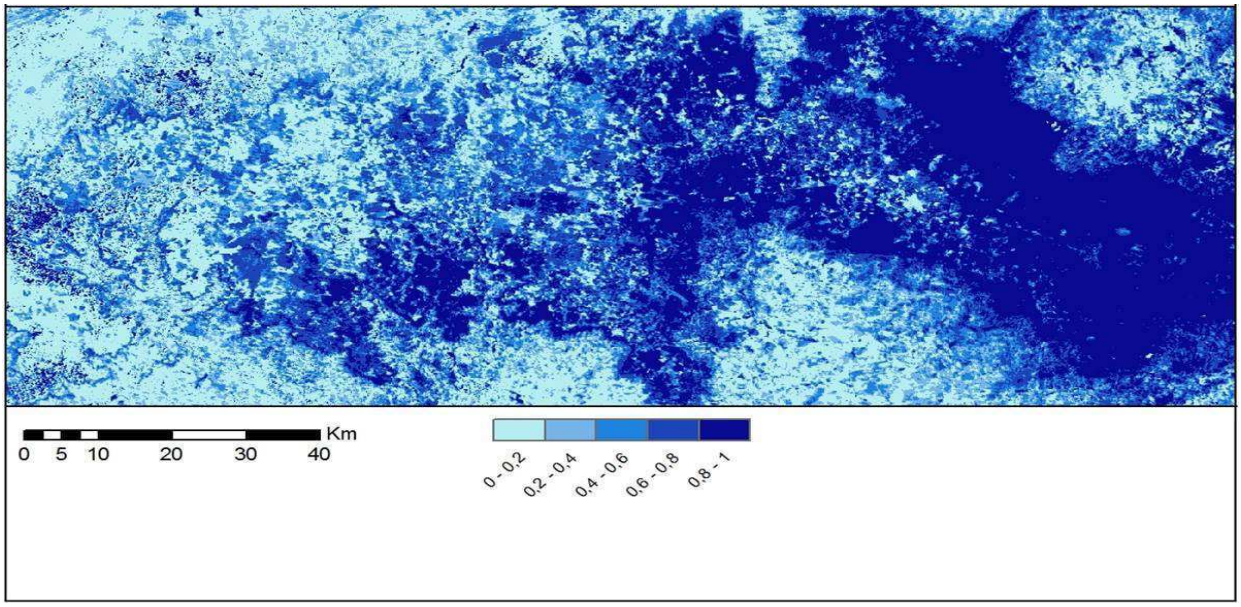

Figura 5.28 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 21/09/2008.

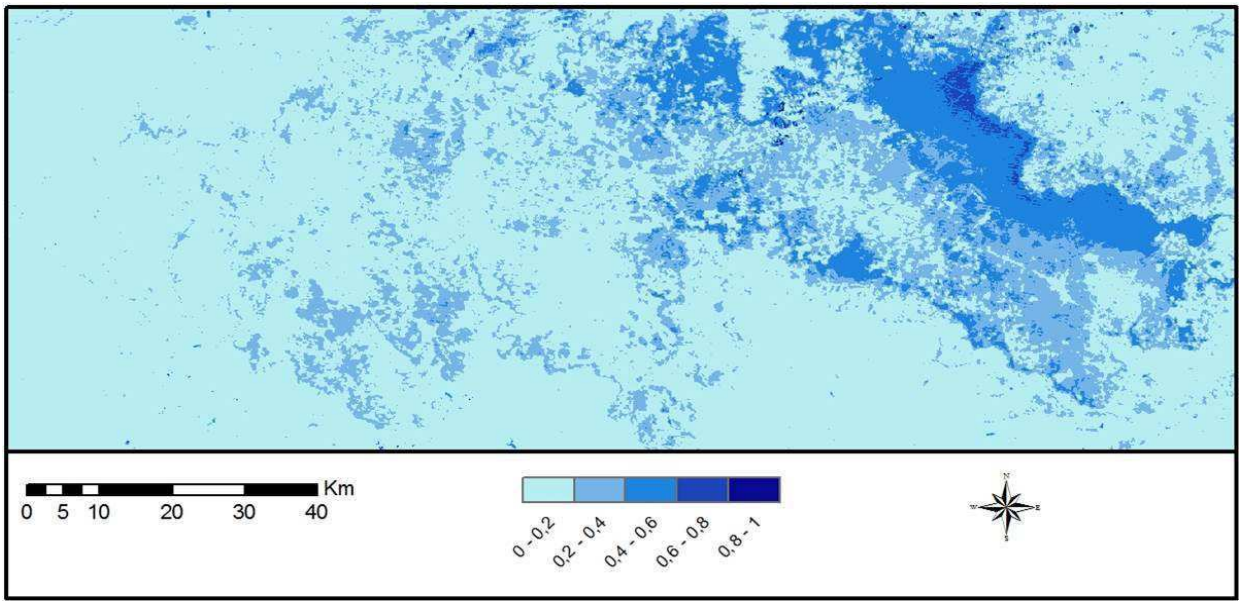

Figura 5.29 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 24/09/2009.

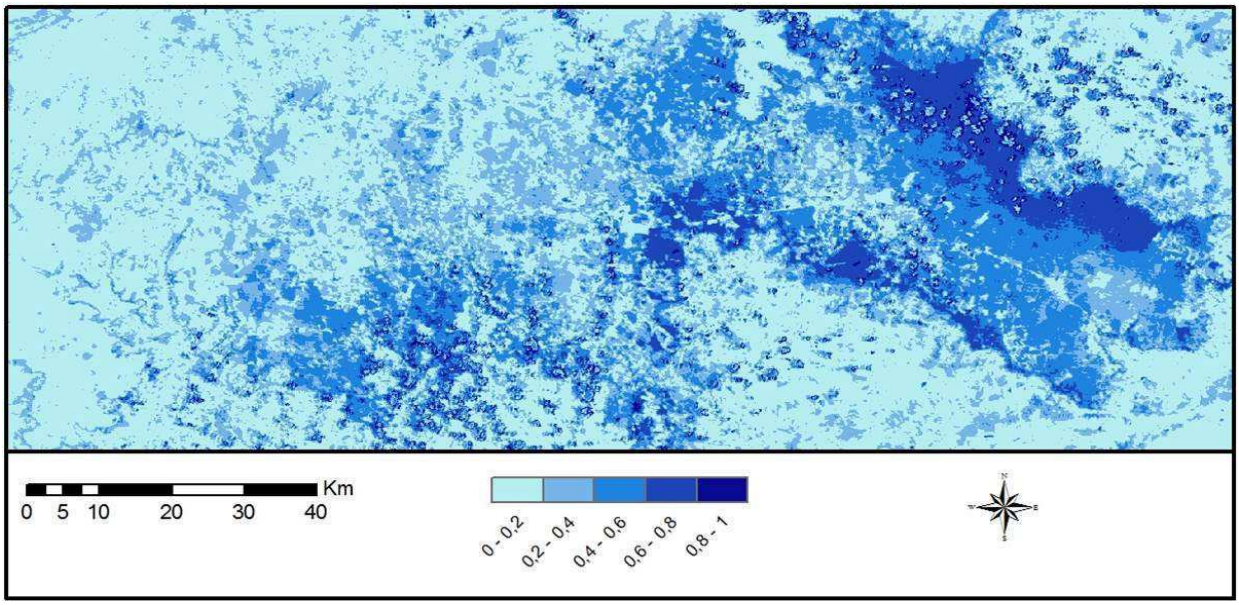

Figura 5.30 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 13/10/2010.

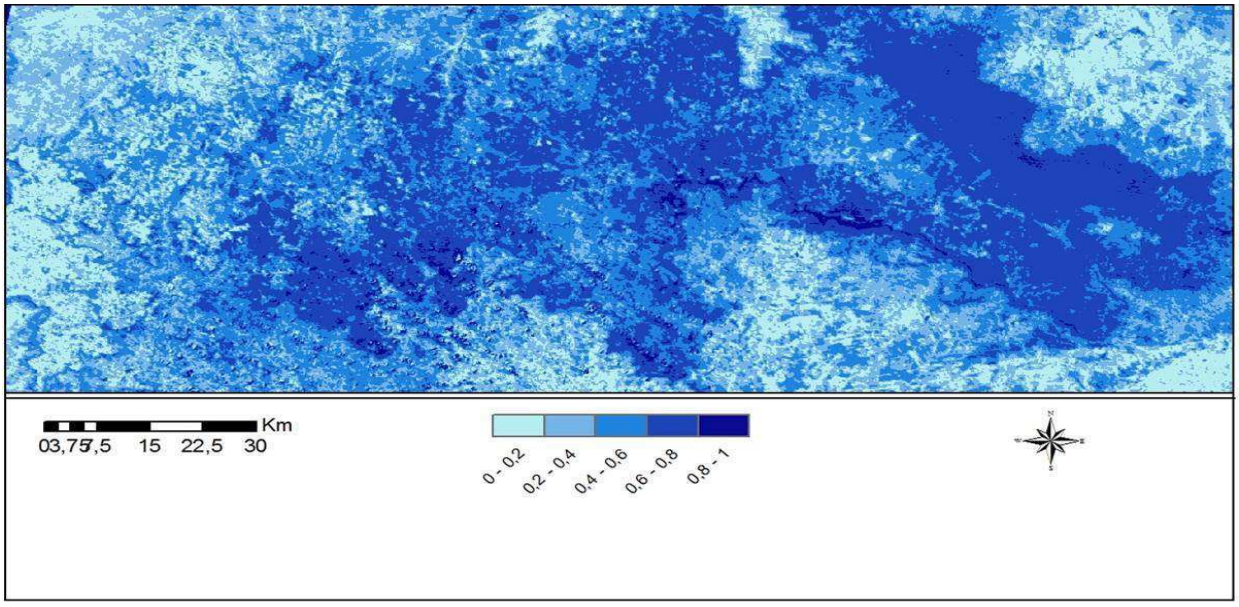

Figura 5.31 – Imagem da densidade da fração evaporativa (Λ) 29/08/2011.

Analisando as imagens é notável a diminuição progressiva da Λ das cenas datadas de 24/09/2009 a 13/10/2010 por se tratar de anos com precipitação abaixo da média. Para a cena de 29/08/2013 ouve uma ligeira recuperação o que indica uma boa disponibilidade hídrica.

Bezerra (2006) em estudo do balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL obteve

os maiores valores da Λ na Chapada do Araripe e nas suas vizinhanças, tais valores foram 0,75, 0,57, 0,80 e 0,61 para os dias 272, 288, 304 e 320 do ano 2006. Bastiaanssen (2000) obteve valores de 0,99 para áreas irrigadas.

5.7 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

O NDVI médio para o período estudado variou entre 0,27 e 0,46 onde a APAR diária ficou na faixa de 58,79 a 137,18 W m^{-2} para as datas 13/10/2010 e 30/07/2006 respectivamente. Brandão et al. (2007) encontrou valores médios em torno de 0,34 tendo variado entre 0,0 e 0,79 onde a APAR ficou na faixa de 4,84 a 121,18 W m^{-2} para a mesma área. Nas Tabelas 5.22, 5.23 e 5.24 são apresentados os resumos estatísticos para o NDVI da área de floresta nativa densa, área de floresta nativa rala e solo nu. É notável que os valores dos desvios padronizados para as imagens estudadas apresentam valores muito próximos indicando que não ouve variação no índice de cobertura vegetal em toda a cena estudada.

Tabela 5.22 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de floresta nativa densa.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,70	0,70	0,03
18/08/2007	0,69	0,69	0,03
21/09/2008	0,69	0,69	0,03
24/09/2009	0,71	0,71	0,03
13/10/2010	0,64	0,64	0,05
29/08/2011	0,68	0,68	0,04

Tabela 5.23 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de floresta nativa rala.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,51	0,51	0,08
18/08/2007	0,32	0,31	0,07
21/09/2008	0,35	0,35	0,06
24/09/2009	0,44	0,44	0,08
13/10/2010	0,25	0,25	0,05
29/08/2011	0,50	0,50	0,08

Tabela 5.24 – Resumo estatístico dos resultados do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para área de solo nu.

Data	Media	Mediana	Desvio Padrão
30/07/2006	0,18	0,18	0,06
18/08/2007	0,17	0,16	0,04
21/09/2008	0,17	0,17	0,05
24/09/2009	0,19	0,18	0,06
13/10/2010	0,12	0,12	0,03
29/08/2011	0,20	0,19	0,06

Analisando as cartas do NDVI podemos identificar grupos de vegetação, com distintos valores para este parâmetro, as quais são predominantes: floresta nativa densa constituída principalmente por floresta subperenófila tropical plúvio – nebular ou floresta de mata úmida, determinada pela altitude e exposição aos ventos úmidos (1000 m de altitude), vegetação semi-densa predominantes em áreas com altitudes entre 800 e 900 metros de altitude denominada floresta subcadocifólia xeromorfa ou cerradão, vegetação nativa rala predominante nas encostas da Chapada do Araripe e em pequenos encraves sobre a chapada, onde cerca de 62%, é coberta por vegetação nativa (arbustos), com agricultura de subsistência. A vegetação rala (na maior parte gramíneas, e pequenos arbustos apresentando áreas de solo exposto) compreende cerca de 11% da região estudada. As imagens foram

escolhidas para um período de alto NDVI (julho, agosto, setembro e outubro), os quais apresentaram médias em torno de 0,36 para toda a cena.

Nas figuras de 5.32 a 5.37 são apresentadas as imagem da densidade de NDVI para as datas estudadas.

Nas imagens, a densidade de NDVI é apresentada numa escala que vai desde uma coloração verde esbranquiçado a uma tonalidade de verde mais escuro, essa coloração em termos de valores varia de -1 a 1 com valores médios predominantes em torno de 0,69 para a área de floresta nativa densa, 0,35 para áreas de floresta nativa rala e 0,17 para área de solo nu.

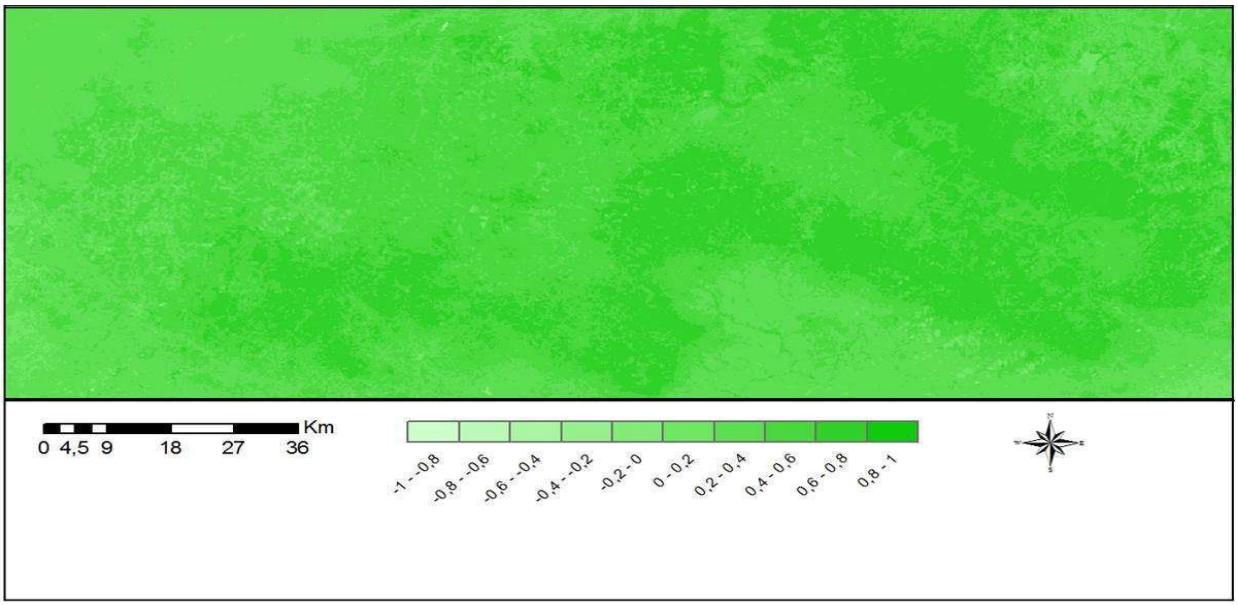

Figura 5.32 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 30/07/2006.

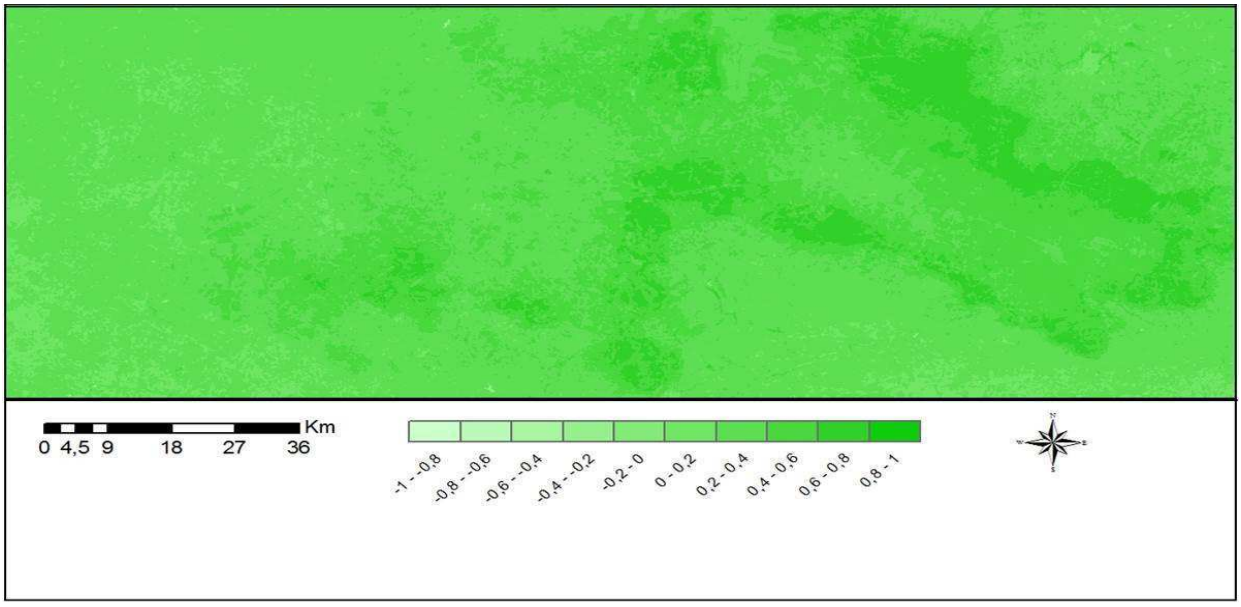

Figura 5.33 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 18/08/2007.

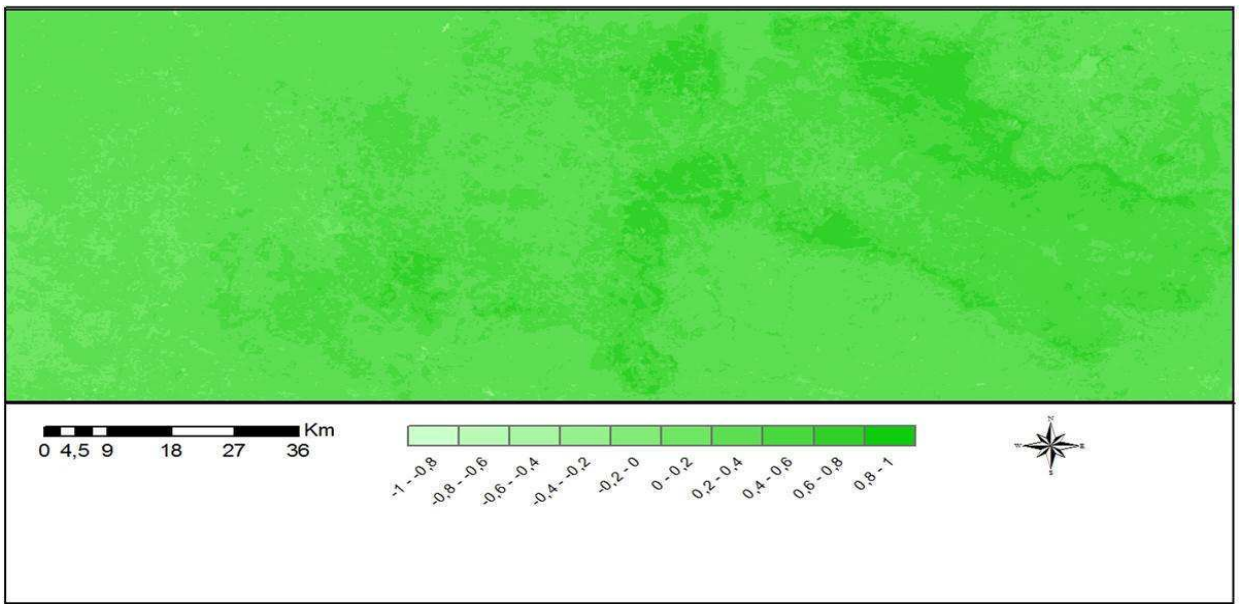

Figura 5.34 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 21/09/2008.

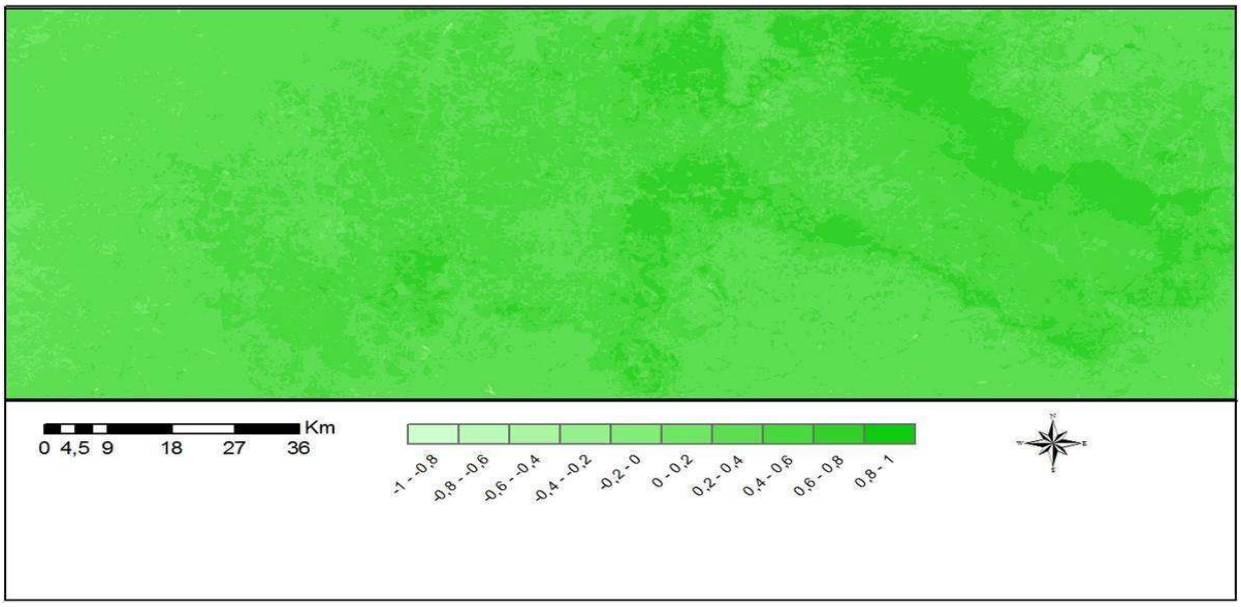

Figura 5.35 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 24/09/2009.

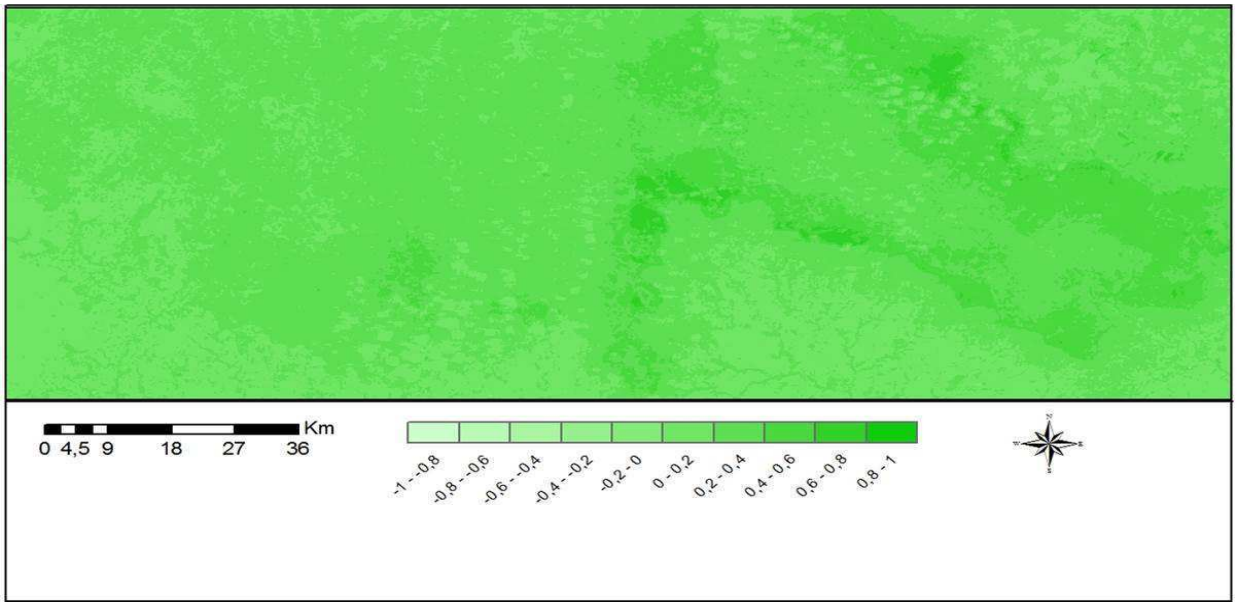

Figura 5.36 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 13/10/2010.

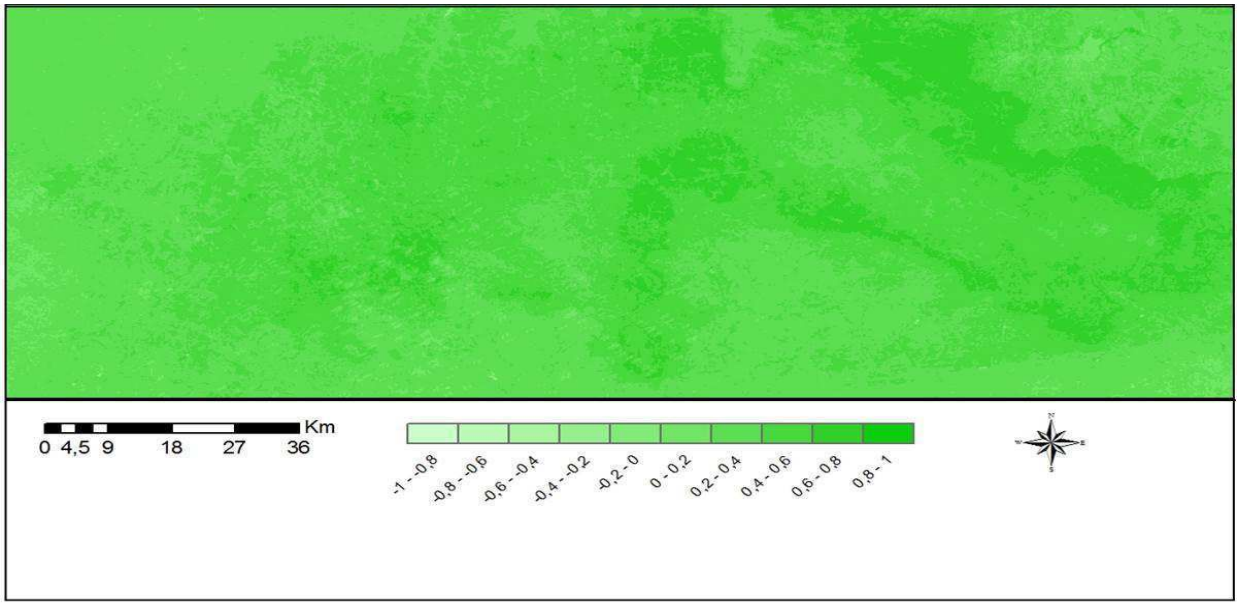

Figura 5.37 – Imagem da densidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 29/08/2011.

5.8 Biomassa Acumulada (Bio_Acum).

Devido aos altos valores do NDVI observados, o valor médio da biomassa foi elevado especialmente para áreas de floresta nativa densa.

Nas Figuras 5.38, a 5.43 estão apresentadas as imagens com a configuração espacial dos valores da biomassa no momento da passagem do satélite, nos dias 211, 230, 265, 267, 286, 241, dos anos de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011 respectivamente.

Nas imagens, as áreas com tonalidade verde limão representam as áreas da superfície com valores acumulados de biomassa vegetal maior que 750 kg m^{-2}. Representam as áreas com boa cobertura vegetativa, que envolvem floresta nativa densa (Floresta Nacional do Araripe). As áreas em verde claro (600 a 750 kg m^{-2}) representam as áreas de floresta nativa rala e áreas agrícolas irrigadas. As áreas com tonalidade amarelo representam valores de Bio_Acum entre 450 e 600 kg m^{-2}. Observa-se que esses valores concentram-se principalmente nas encostas da chapada, onde é predominante uma vegetação de menor porte.

As áreas com tonalidade do laranja ao vermelho (300 a < 150 kg m^{-2}) representam áreas com solo nu ou ainda áreas com vegetação de caatinga em estádio de dormência.

Nas Tabelas 5.25, 5.26 e 5.27 são apresentados o resumo estatístico para a Bio_Acum para área de floresta nativa densa, floresta nativa rala e para solo nu da cena

estudada para os dias 211, 230, 264, 267, 286, 241 dos anos 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011 respectivamente. Nota-se altos valores para o acumulo da biomassa vegetal principalmente na área de floresta nativa densa. Tais valores médios oscilaram entre 868,87 Kg m^{-2} na data 29/08/2011 e 1764,54 Kg m^{-2} na data 18/08/2007 isto se explica pelo fato que esta área é constituída de arvores de grande porte e bem adensada. Para área de floresta nativa rala os valores oscilaram de 199,61 a 600,32 Kg m^{-2} para as respectivas datas 21/09/2008 e 30/07/2006. A área de solo nu foi a que menos apresentou discrepância, apresentando valores entre 10,57 e 20,23 Kg m^{-2} para as datas 30/07/2006 e 24/09/2009 respectivamente. Porem é observado um decréscimos nestes valores que parte da data 24/09/2009 a 29/08/2011para todas as sub-áreas estudadas, o que é característico da diminuição e da má distribuição do volume da precipitação pluvial.

Tabela 5.25 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de floresta nativa densa em kg m^{-2}.

Data	Media ($kg\ m^{-2}$)	Mediana ($kg\ m^{-2}$)	Desvio Padrão ($kg\ m^{-2}$)
30/07/2006	1205,18	1223,60	106,43
18/08/2007	1764,54	1768,60	60,37
21/09/2008	1645,64	1659,20	93,54
24/09/2009	1710,84	1720,50	87,66
13/10/2010	973,32	981,69	110,84
29/08/2011	868,87	877,27	98,24

Tabela 5.26 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de floresta nativa rala em kg m^{-2}.

Data	Media ($kg\ m^{-2}$)	Mediana ($kg\ m^{-2}$)	Desvio Padrão ($kg\ m^{-2}$)
30/07/2006	600,32	613,70	216,23
18/08/2007	244,79	206,17	192,04
21/09/2008	199,61	182,92	143,66
24/09/2009	519,84	532,23	255,23
13/10/2010	258,10	254,20	110,40
29/08/2011	366,72	372,84	151,46

Tabela 5.27 – Resumo estatístico dos resultados do acumulo de biomassa vegetal para área de solo nu rala em kg m^{-2}.

Data	Media ($kg\ m^{-2}$)	Mediana ($kg\ m^{-2}$)	Desvio Padrão ($kg\ m^{-2}$)
30/07/2006	10,57	3,78	15,95
18/08/2007	16,99	6,11	27,46
21/09/2008	11,24	4,23	15,57
24/09/2009	20,23	6,48	35,91
13/10/2010	4,89	1,69	6,95
29/08/2011	12,86	5,47	19,35

De acordo com a variação da cobertura do solo e condições de umidade, a eficiência da luz ε variou de 0,61 a 2,70 (g/MJ), onde foi utilizado ε'= 2,5 g/MJ, considerando os fatores que alteram a eficiência da luz como otimizados. Observa-se que, ao aumentar o NDVI a biomassa acumulada acima da superfície é incrementada proporcionalmente. O crescimento da biomassa se apresenta numa faixa de 571,82 a 1781,60 (ton/ha). Brandão et al (2007), utilizando o NDVI para determinação da biomassa na região do Cariri e em parte da Chapada do Araripe obteve valores entre 0,73 a 333,42 (ton/ha). Namayanga (2002), Estimou a biomassa vegetal e o seqüestro de carbono em floresta de Acacia obteve valores medios de 1315,44 ton/ha.

O auto valor para o acumulo de Biomassa vegetal sobre a Chapada do Araripe, se deve ao fato de que a área com cobertura de árvores é responsável por aproximadamente 70% da biomassa estimada, onde o NDVI está acima de 65%.

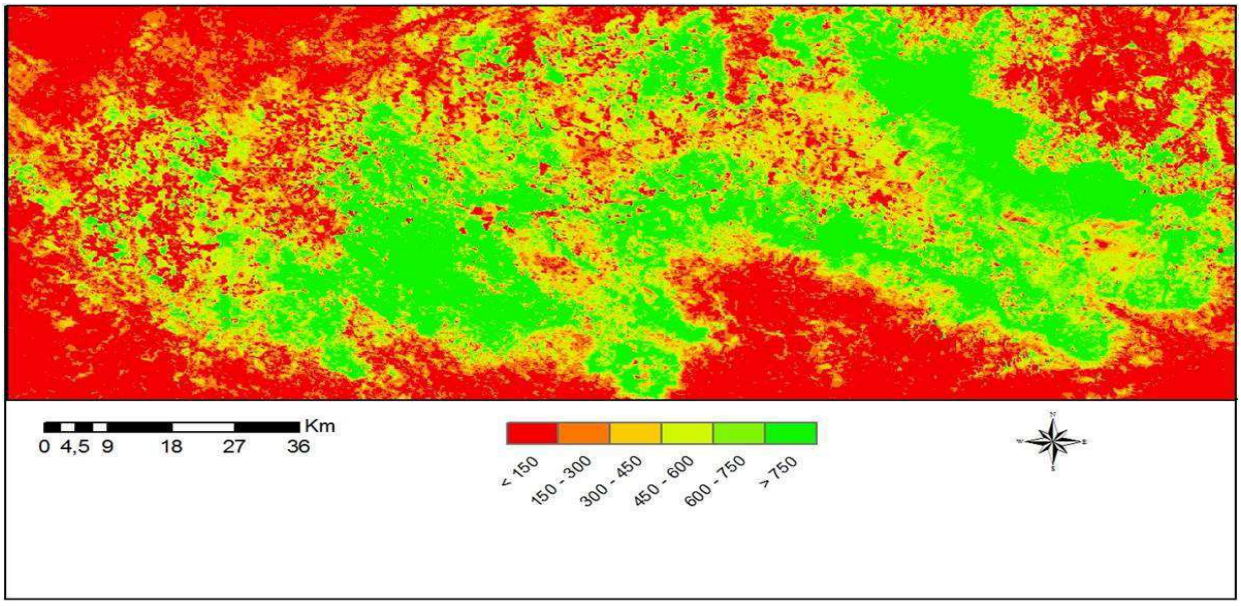

Figura 5.38 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 30/07/2006.

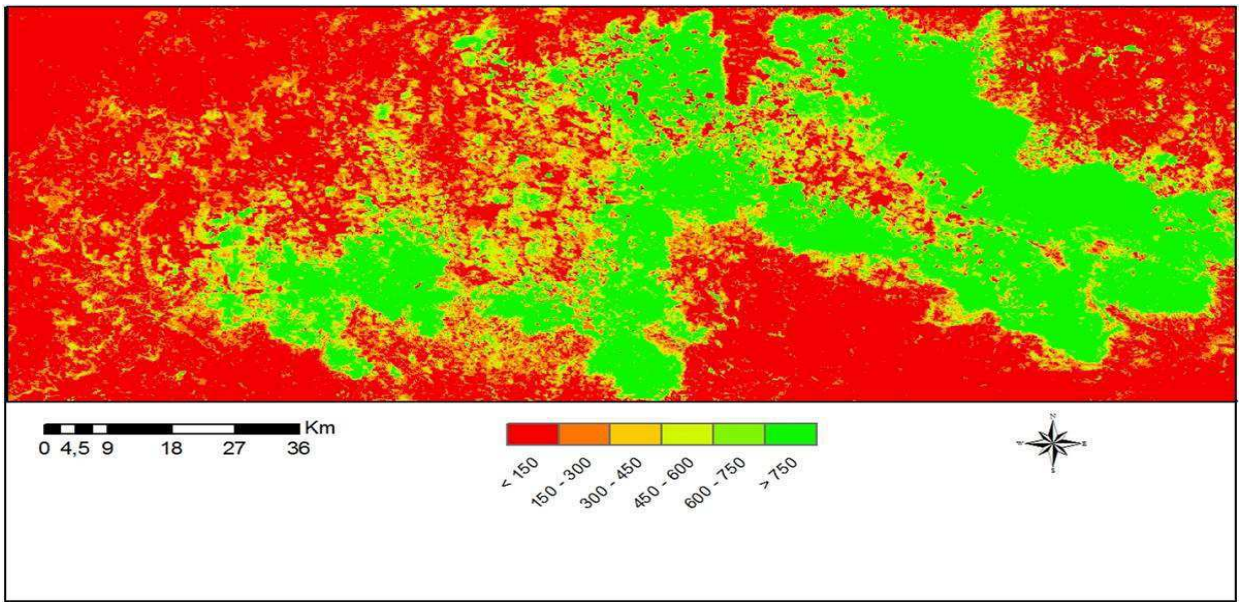

Figura 5.39 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 18/08/2007.

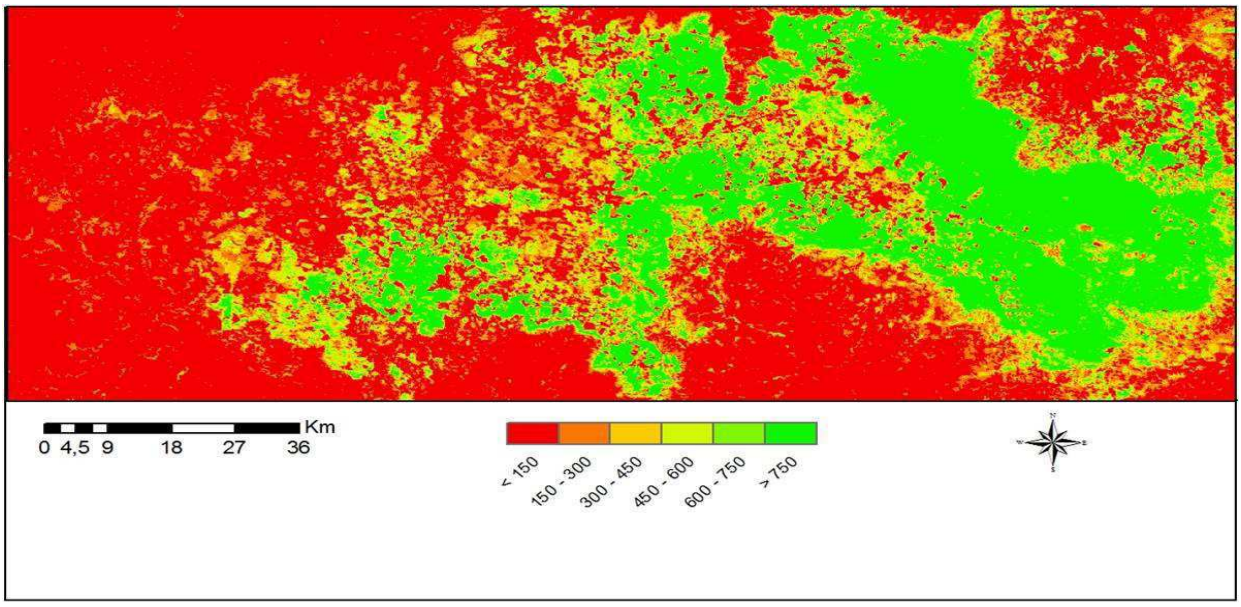

Figura 5.40 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 21/09/2008.

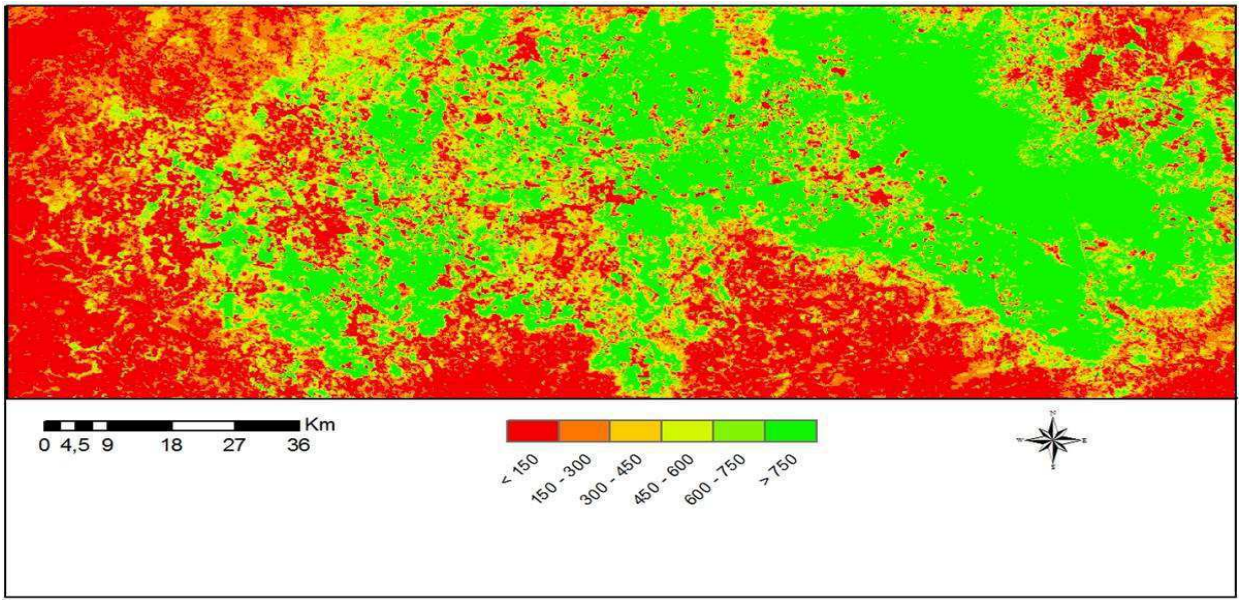

Figura 5.41 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 24/09/2009.

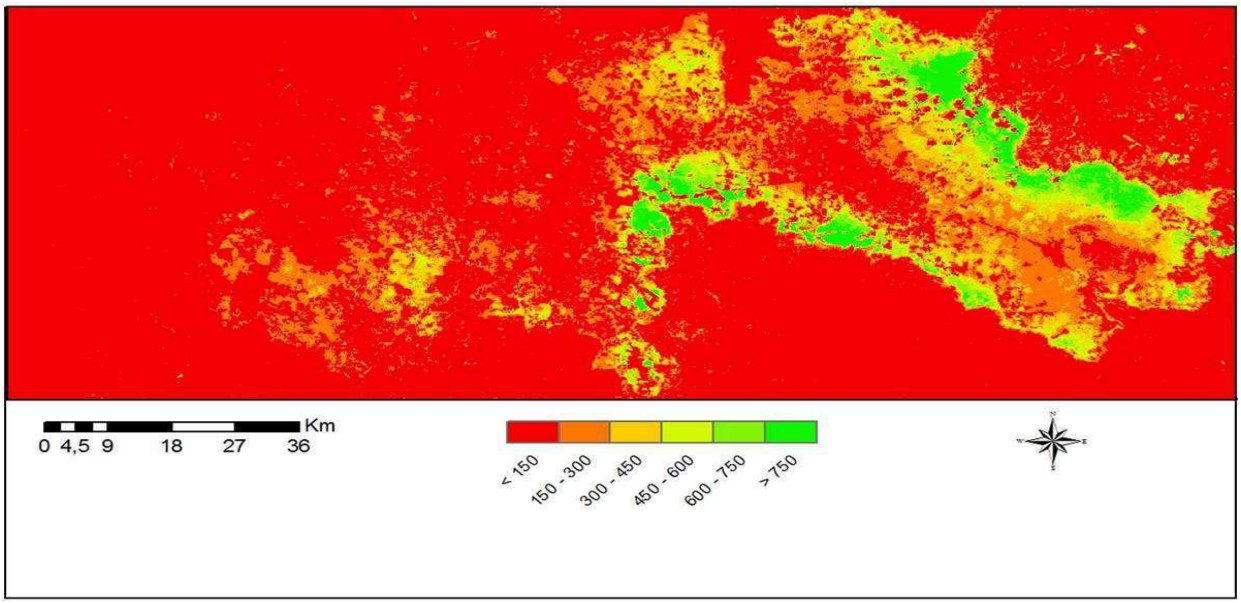

Figura 5.42 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 13/10/2010.

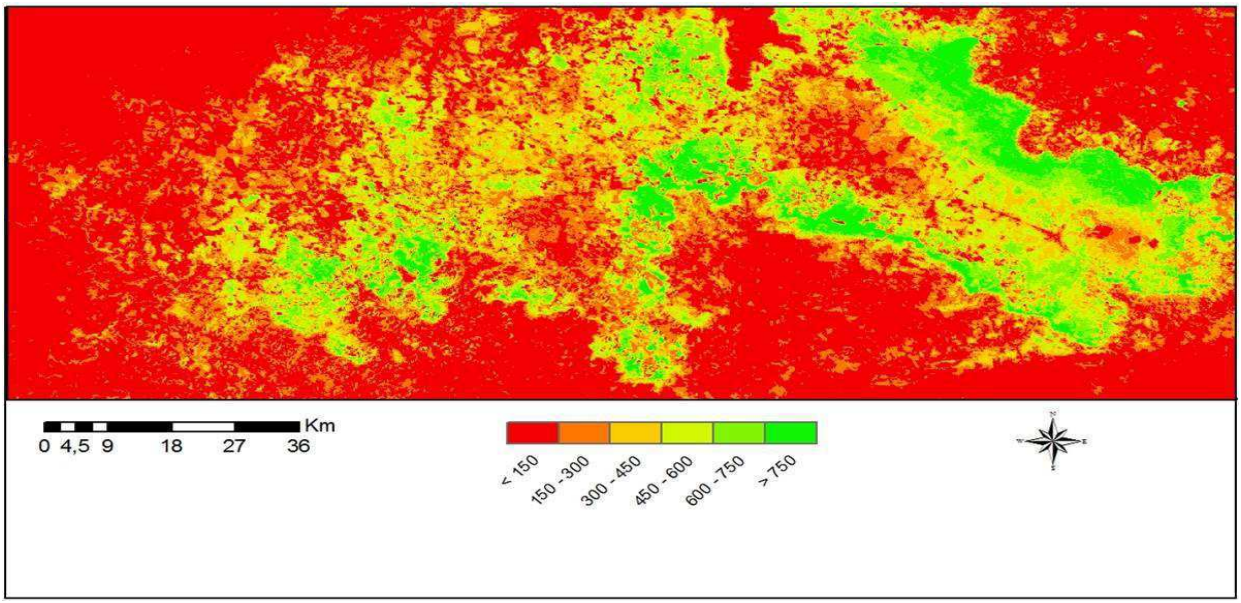

Figura 5.43 – Imagem da densidade do acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe (Bio_Acum) 29/08/2011.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.

6.1 Conclusões

Diante dos resultados obtidos das cenas e datas estudadas, conclui-se que:

1. A estimativa para a eficiência do uso da luz (ε) através do algoritmo CASA fornece valores muito consistentes para a biomassa acumulada;
2. Os valores obtidos para o acumulo de biomassa vegetal na Chapada do Araripe foram compatíveis com a literatura, considerando as mesmas faixas espectrais selecionadas para o NDVI;
3. O auto valor encontrados para o acumulo da Biomassa vegetal sobre a Chapada do Araripe, se deve aos altos valores de NDVI, acima de 65%.

6.2 Sugestões.

Sugere-se que:

1 Estudos posteriores podem tomar como base a variação de ε para diversas culturas em condições de alta evapotranspiração;

2 Não é aconselhável se fazer estudos com aplicações agrometeorológicas na região com dados de sensores com resolução espacial menor que o TM Landsat 5 (30 x30m).

3 Para um estudo mais detalhado seja utilizado recorte apenas da Chapada do Araripe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; PRIANTE FILHO, N.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma Floresta Tropical no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v.21, p.248 257, 2006.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual –** Idaho implementation, Idaho University, Idaho, USA, 2002.

ALVES, C. C. E.; BEZERRA, L. M. A. & MATIAS, A. C. C. **A. I**mportância da conservação/preservação ambiental da Floresta Nacional do Araripe para a região do Cariri - Ceará/Brasil. **Revista Geografia e Ambiente Central**, Número Especial EGAL: 1-10, 2011.

ANDRADE, R. G.; BATISTELLA, M.; BARBOSA, R. A.; SEDIYAMA, G. C.; DELGADO, R. C.; LIMA, E. P. **Aplicação de Sensoriamento Remoto na estimativa da biomassa vegetal de pastagem no Mato Grosso do Sul**. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte, 2009.

AUGUSTO, L. G. S.; GÓES, L. **Compreensões integradas para a vigilância da saúde em ambiente de floresta: o caso da Chapada do Araripe, Ceará, Brasil**. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 23, sup. 4, p. S549-S558, 2007.

ÁVILA, P. L. R.; ALVES, A.; SOUZA FILHO, J. D.; CATTANIO, H**. Estimativa dos fluxos de calor sensível e latente na floresta através do método gradiente.** Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. Disponível em: WWW.cbmet2010.com/anais/artigos/961_33327.pdf Acesso em: 25/08/2013.

BARRETO P. **Porque o desmatamento sobe e desce?** Apresentação no V Seminário Técnico Científico de Análise de Dados Referentes ao Desmatamento na Amazônia Legal, Anápolis 2007.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain.** Ph. D. Thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. **A. remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation.** Journal of Hydrology, v. 212-213, p. 198-212, 1998

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

BEZERRA, M. V. C. **Balanço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto.** 108 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.

BEZERRA, B. G. **Obtenção da evapotranspiração diária no Cariri Cearense utilizando imagens Landsat 5-TM e o algoritmo SEBAL.** 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB 2006.

BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, V. DE P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. DE. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.12, p.393–399, 2008.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. **O uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe.** Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE, 2007. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.13.39.22/doc/75-81.pdf. Acesso em outubro de 2012.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer.** FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 1997. 55 pp.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, p. 299, 1982.

CARVALHAIS, N., MYNENI, R., AND SEIXAS, J., **Scale Impacts on Model estimates of Net Ecosystem Productivity,** in AGU Fall Meeting, San Francisco, December 13-17, 2004.

CARVALHAIS, N., MYNENI, R., AND SEIXAS, J., **Modelação de Fluxos de carbono nas florestas de Guiné – Bissau**, Cense, Maio de 2010.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991.

CHANDER, G. MARKHAM, B. **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post calibration Dynamic Ranges.** IEEE Transaction son Geoscience and Remote Sensing, v, 41, n. 11, 2003.

CHEN, S. C. **Contribuição dos dados de satélite no sistema de previsão de safras**. São José dos Campos: INPE, 7p. 1990.

COELHO, J. C. **Biomassa - Biocombustíveis - Bioenergia.** Brasília, Ministério das Minas e Energia. 1982. 100p.

CONGALTON, R.G. **A. comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Bethesda, 54, 1669-1671, 1992.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP.1992.

COURAULT, D.; SEGUIM, B.; OLIOSO, A. **Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use meso scale atmospheric models.** Icid Workshop on remote sensing of et for large regions, 2002, Montpellier.

CRAMER, W., KICKLIGHTER, D.W., BONDEAU, A., MOORE III, B., CHURKINA, G., NEMRY, B., RUIMY, SCHLOSS, A.L., **Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results,** in Global Change Biology, 5, 1-15, 1999.

DANTAS, V. A. **Fluxos de calor sensível e latente armazenados no dossel vegetativo e análise de infiltração de água no solo em Floresta Tropical**. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

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

DONG, J.; KAUFMANN, R. K.; MYNENI, R. B.; TUCKER, C. J.; KAUPPI, P. E.; LISKI, J.; BUERMANN, W.; ALEXYEV, V.; HUGHES, M. K. **Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources and sinks.** Remote Sensing of Environment, v.84, p.393-410, 2003.

EWERS, R. M.; LAURANCE, W. F.; SOUZA, C. M. Temporal fluctuations in Amazonian deforestation rates. **Revista Acta Amazônica,** v.35, p.303-310, 2008.

FARAH, H. O.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. **Evaluation of the temporal variability of the evaporative fraction in a tropical watershed.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 5, p. 129-140, 2004.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: Dinâmica, impactos e controle. **Revista Acta Amazônia,** vol 3, n.3, p. 395-400, 2006.

FEITOSA, J. R. P. **Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat -TM e NOAA-AVHRR na Estimativa do Balanço de Radiação à Superfície.** 164f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.

FERRAZ, R. P. D.; MEIRELLES, M. S. P.; JOBÁGGY, E.; JONATHAN, M. COUTINHO, H. L. C. **Utilização dos dados MODIS e modelo SEBAL para a estimativa da perda de água por evapotranspiração: Uma proposição metodológica para o monitoramento do impacto da expansão da cultura canavieira na dinâmica hídrica regional.** Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, INPE, p. 175-182. 2009. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.12.18/doc/175-182.pdf Acesso em: 03/08/2012

FERREIRA, A. G. **Meteorologia Prática.** São Paulo, Oficina dos Textos, 2006.

FERREIRA, E. A. B.; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; SANTOS, J. L. M. **Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO2 em solos sob Campo Limpo Úmido no Cerrado.** In: Simpósio Nacional do cerrado, 9, 2008, Brasília, Embrapa CPAC, 2008.

FIELD, C.B., GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J., **Remote sensing of terrestrial photosynthesis, in Ecophysiology of Photosynthesis**, edited by E. D. Schulze and M. M. Caldwell (Berlin: Springer - Verlag), pp. 511-527, 1995.

GOWER, S.T., KUCHARIK, C.J., NORMAN, J.M. **Direct and indirect estimation of leaf area index, *f* APAR, and net primary production of terrestrial ecosystems.** Remote Sensing Environment. v. 70, p. 29–51, 1999.

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. **Análise da variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2001. 1 CD-ROM.

HEMAKUMARA, H. M.; CHANDRAPALA, L MOENE, A. F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetations áreas measured from large aperture scintilometer. **Agriculture Water Manegement,** v.58, p. 109-112, 2003.

HORSTMANN, N.; BONINI, R. L.; VIANA, B. V. G.; PIANNA, B. M.; FREITAS, D. M.; SOUZA, R. A. **Análise do desmatamento na Chapada do Araripe.** In: V Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. 2011, Feira de Santana – BA 2011.

HOUGHTON, R.A., 2005. **Aboveground forest biomass and the global carbon balance**. Global Change Biology 11, 945-958.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment.** 25:295-309, 1988

LILLESAND, T. M.; KIEFFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation** John Wyley & Sons. 3. ed. New York EUA, 750p. 1994.

LIMAVERDE, R. **Os registros rupestres da Chapada do Araripe Ceará Brasil**. Anais do Congresso Internacional da SAB - Sociedade Brasileira de Arqueologia - Florianópolis SC Setembro/Outubro de 2007. Disponível em: http://www.fundacaocasagrande.org.br/pdf/artigo.pdf acesso: 05/ 05/2012

Margulis, S. **Causas do desmatamento na Amazônia brasileira.** The World Bank, Brasília 2003. Disponível em http:// www.finefrint.com (acessado em novembro de 2012).

MARKHAN, B.L.; BARKER, J.L. **Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances.** International Journal of Remote Sensing, Basingstoke, v.8, n.3, p.517-523, 1987.

MESQUITA JR. H. N. **Modelagem da resposta espectral das fisionomias de Cerrado em relação às variações climáticas sazonais.** 2003. 244p. Tese (Doutorado em Ecologia) Instituto de Biociências Universidade de São Paulo, São Paulo 2003.

MONTEITH, J. L. **Solar radiation and productivity in tropical ecosystems**. J. Appl. Ecol. V.9, p.747–766, 1972.

MORSE, A., TASUMI, M., ALLEN, R. G., & KRAMBER, W. J. **Application of SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Stream flow Depletion in the Bear River Basin of Idaho Through.** Remote Sensing; Final Report. 2000

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco** XVII, 320 p.(Tese) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2008.

NUNES, S. S. S. **Estimativas de biomassa e carbono e indicadores para restauração de florestas secundárias em Paragominas, Pará.** 2011. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo 2011.

OLIVEIRA-GALVÃO, A. L. C; SAITO, C. H. **Mapeamento sobre desertificação no Brasil: uma análise comparativa.** Brasil Florestal, v. 22, n.77, p 9-20, 2003.

OLIVEIRA, R. S. CARTILHA: **Educação Ambiental GeoPark Araripe**. Universidade Regional do Cariri URCA, Fortaleza, 2011.

PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F.; COSTA, J. M. N. DA; HIGUCHI, P. **Balanço de radiação no interior de uma floresta estacional semidecidual secundária no domínio da Mata Atlântica.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais do XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, p. 200-206. 2000.

RODRIGUES, M. **Introdução ao geoprocessamento** In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento 23-25 maio, 1990. Anais. São Paulo, USP. Escola Politécnica, 1990, p 1-26

ROUSE, J.W., HAAS; R .H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in Plains with ERTS,** Third ERTS Symposium, NASA SP- 351 I, 309 317,1973

RUDORF, B. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Apresentação de Slides. 5º Seminário de Sensoriamento Remoto, Interpretação e Processamento de Imagens de Satélite. Cachoeira Paulista, São Paulo, 2008. Disponível em: www.dgi.inpe.br/ndc/.../Bernardo/Introducao_SR-s24112008.pdf. Acesso em: novembro de 2012.

SAIDELLES, F. L. F. **Determinação da biomassa e altura de amostragem para a quantificação de nutrientes em *Acacia mearnsii* De wild.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS (Tese de Doutorado) 2005.

SAMPAIO, E. V. DE S. B.; CESTARO, L. A. & KAGEYAMA, P.Y. **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga.** 369 p. Ministério do Meio Ambiente, 2010.

SANCHES – AZOFEIFA, G. A. CASTRO, K. L.; RIVARD, B. KALASKA, M. R. **Remote Sensing Research Priorities in Tropical Dry Forest Environments.** Biotrópica, n. 35, v.2, p.134-142, 2003.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de textos 2008.

SANTOS, R. M.; LIMA, J. E. F.; EID, N. J.; KOIDE, S.; SILVA, E. S.; BRITO, R. S. **Avaliação preliminar do uso do modelo SEBAL para a estimativa da distribuição espacial da evapotranspiração de uma área do Cerrado.** Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Florianópolis, 2007 CD ROM.

SANTOS, C. A. C. **Estimativa da evapotranspiração real diária através de análises micrometeorológicas e de sensoriamento remoto.** 134p. Tese (Doutorado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SELLERS, P. J, Y. MINTZ, Y. C. SUD, A. DALCHER A. **Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models.** J. Atmos. Sci., 43(6):505-531, 1986.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens LANDSAT 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia.** v. 12. n. 2, p. 201-211. 2005.

SILVA, B. B. **Determinação da evapotranspiração com imagens de Landsat e Sebal.** Mini – curso. Programa de Pós Graduação de Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Junho de 2010. 21p.

SOARES, T. S.; CARNEIRO, A. C. O.; GONÇALVES, E. O.; LELLES, J. Uso da biomassa vegetal na geração da energia. **Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal.** ano IV, número, 08, agosto de 2006.

SOUZA FILHO, D. D.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, C. P.; ROCHA, E. J. P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v.21, n.3b, p.318-330, 2006.

S. U. D. E. C., **Atlas do Ceará**. Segunda Edição, Fortaleza, 1986.

SHUTTLEWORTH, W. J.; GURNE Y, R. J.; HSU, A. Y. & ORMSBY, J. P. FIFE: **The variation in energy partition at surface flux sites.** IAHS Publ. No. 186, 1989.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery.** Dissertation presented at The University of Idaho, USA. 357 p, 2003.

VARGAS, L. A.; ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; JORGENSEN, U. **Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of Miscanthus sinensis 'Goliath' from radiation measurements.** Biomass and Bioenergy, n. 22, p.1–14. 2002.

VITOUSEK P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.;MELLILO, J. M. **Human domination of Earth' secosystems.** Science, 277, 494-499. 1997.

Download das imagens de satélite. Disponível em: www.**inpe**.br Acesso: 03/04/2013

Desflorestamento de uma área na Chapada do Araripe. Disponível em: www.crato.org Acesso: 25/04/2013

Imagem Lado norte da Chapada do Araripe. Disponível em: www.nopatio.com.br Acesso: 12/05/2013

Espectro eletromagnético: Disponível em www.crv.educacao.mg.gov.br Acesso: 07/03/2013

Esquema do funcionamento do sensoriamento remoto. Disponível em: www.geoprocessamentoifgoiass.blogspot.com Acesso: 12/04/2013

Modelo de Elevação Digital DEM. Disponível em: www.**relevo**br.cnpm.**embrapa**.br Acesso: 04/05/2013