

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Lucas Barbosa Cavalcante

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL EM LINGUAGEM  
LEGAL/SPRING. APLICAÇÃO PARA O COMPLEXO IRRIGADO DE  
PETROLINA-PE/JUAZEIRO-BA**

Maceió – Alagoas  
2015

Lucas Barbosa Cavalcante

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL EM LINGUAGEM  
LEGAL/SPRING. APLICAÇÃO PARA O COMPLEXO IRRIGADO DE  
PETROLINA-PE/JUAZEIRO-BA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Alagoas como requisito  
parcial para a obtenção do grau de Mestre em  
Meteorologia

Maceió – Alagoas  
2015

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

C376i Cavalcante, Lucas Barbosa.  
Implementação do algoritmo SEBAL em linguagem LEGAL/SPRING: aplicação para o complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA / Lucas Barbosa Cavalcante. – 2015.  
159 f. : il.

Orientador: Heliofábio Barros Gomes.  
Coorientadora: Rosilene Mendonça Nicácio Jiménez  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Maceió, 2015.

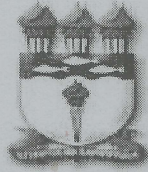
Bibliografia: f. 131-136.

Apêndices: f. 137-156.

Anexo: f. 157-159.

1. Software livre. 2. Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING). 3. Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico (LEGAL). 4. Evapotranspiração. I. Título.

CDU: 551.573



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

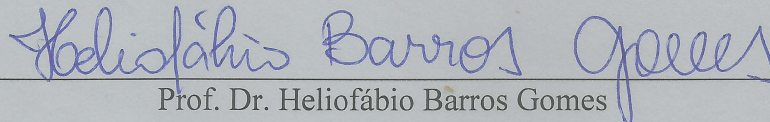
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-122.

**“IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL EM LINGUAGEM LEGAL/SPRING:  
APLICAÇÃO PARA O COMPLEXO IRRIGADO PETROLINA-PE / JUAZEIRO-BA”**

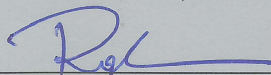
*Lucas Barbosa Cavalcante*

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

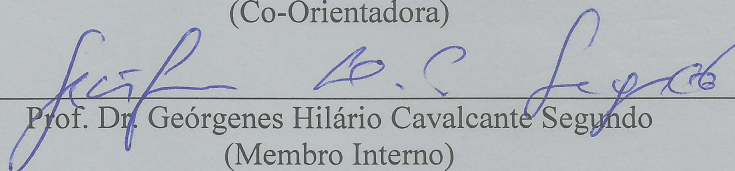
Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

  
\_\_\_\_\_

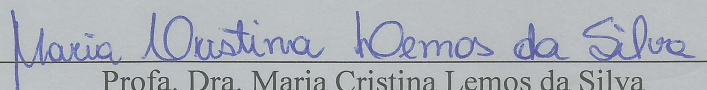
Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_

Profa. Dra. Rosilene Mendonça Nicácio Jimenez  
(Co-Orientadora)

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo  
(Membro Interno)

  
\_\_\_\_\_

Profa. Dra. Maria Cristina Lemos da Silva  
(Membro Externo – ClimaTempo/SP)

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Helber Barros Gomes  
(Membro Externo – UNIFESP/SP)

Abril/2015

*Este trabalho é dedicado à memória de minha avó,  
Elvira Barros Aranda, pessoa incrível que sempre esteve e estará presente em minha vida,  
me guiando e ajudando a trilhar bons passos.*

# AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Ronaldo Cavalcante e Valdieje Barbosa Cavalcante, pelo apoio incondicional na minha vida, sem eles não sou nada.

A minha noiva e futura esposa Aline da Silva Inácio, pela atenção, carinho, amor e cumplicidade, em todos os momentos. Sempre me motivando e auxiliando a seguir em frente.

Ao meu estimado irmão Luan Barbosa Cavalcante, pelos auxílios nas horas que precisei.

Ao meu orientador e amigo Heliofábio Gomes Barros, pelo incentivo a entrar no mestrado e apoio dado em todos os projetos propostos.

A minha coorientadora Rosilene Mendonça Nicácio Jiménez, que me auxilia desde a graduação em Engenharia de Agrimensura, sempre com ótimos conselhos e motivando a sempre fazer o melhor.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida desde meu ingresso no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (UFAL/ICAT), até a conclusão do mesmo.

A Universidade Federal de Alagoas, que desde 2008 quando ingressei na graduação em Engenharia de Agrimensura até hoje, vem sendo um local de desenvolvimento intelectual e pessoal.

Aos tecnologistas João Pedro Cerveira Cordeiro e Carlos Alberto Felgueiras, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela ajuda prestada neste trabalho.

*“O conhecimento serve para encantar  
as pessoas, não para humilhá-las.”  
(Mário Sérgio Cortella)*

# RESUMO

O entendimento das interações Água-Solo-Atmosfera é de extrema importância para a devida compreensão de todos os processos envolvidos no ciclo hidrológico. Partindo dessa premissa, esta pesquisa tem como objetivo auxiliar este entendimento, mapeando através da implementação do algoritmo SEBAL em uma linguagem livre e nacional, denominada LEGAL; os fluxos de energia à superfície e a evapotranspiração real horária, utilizando-se do sensor TM do LANDSAT 5. Nas análises, optou-se por analisar o desempenho dos scripts gerados a partir de um estudo de caso, a região escolhida foi uma área correspondente ao perímetro irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA, onde através da execução dos scripts foi espacializada e analisada as variáveis envolvidas no balanço de energia: Saldo de Radiação à Superfície, Fluxo de Calor no Solo, Fluxo de Calor Sensível, Fluxo de Calor Latente e a Evapotranspiração Real Horária. Os resultados encontrados indicam um excelente desempenho dos scripts elaborados, onde os valores obtidos possuem boa concordância com valores já consolidados na literatura. Como complemento das análises além de mapas temáticos, foram extraídas amostras e apresentadas suas estatísticas em forma de diagrama de caixa.

**Palavras-chaves:** SPRING. LEGAL. evapotranspiração e *software* livre.



# ABSTRACT

The understanding of Water-Land-Atmosphere interactions is extremely important for the understanding of all the processes involved in the hydrological cycle. Based upon this premise, this research aims to help this understanding, mapping through the implementation of SEBAL algorithm in a free language and national called LEGAL; the surface energy fluxes and real hourly evapotranspiration, using the Landsat TM sensor 5. In the analyzes, we chose to analyze the performance of scripts generated from a case study, the chosen region was an area corresponding to the irrigated perimeter of Petrolina-PE/Juazeiro-BA, where by running the scripts was spatialized and analyzed the variables involved in energy balance: Surface Radiation Balance, Soil Heat Flux, Heat Sensitive Flow, Latent Heat Flux and Real Hourly Evapotranspiration. The results indicate excellent performance of elaborate scripts, where the obtained values show good agreement with values already established in the literature. In addition to the analyzes as well as thematic maps, samples were extracted and presented their statistics box-shaped diagram.

**Key-words:** SPRING. LEGAL. evapotranspiration and free software.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Soldado carregando os pombos para o campo de batalha, (b) Pombo-correio com máquina acoplada ao peito. Fonte: Cabral (2015) . . . . .	27
Figura 2 – Imagem do satélite ERTS-1. Fonte: USGS (2015b) . . . . .	27
Figura 3 – Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M). Fonte: Meneses et al. (2012) . . . . .	30
Figura 4 – Reflectâncias especular e difusora . Fonte: Meneses et al. (2012) . . . . .	30
Figura 5 – Representação de superfície real, interação em conjunto de reflectância especular e difusora. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	31
Figura 6 – Representação da eliminação de um fóton, provocada pela mudança de órbita de um elétron. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	32
Figura 7 – (a) Representação de um sensor passivo, (b) Representação de um sensor ativo. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	33
Figura 8 – Representação de objetos dentro de um pixel, quando mais de um objeto esta presente, o valor captado é a soma de todas as interações e não do objeto individual. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	35
Figura 9 – Representação de diferentes tipos de resolução espacial e seus respectivos satélites. Fonte: Melo (2002). . . . .	35
Figura 10 – Representação dos fenômenos de absorção, reflexão e transmissão. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	36
Figura 11 – Assinatura espectral de alguns alvos encontrados na Terra. Fonte: INPE (2015). . . . .	37
Figura 12 – Representação das diferentes radiações radiométricas. Fonte: Melo (2002). . . . .	38
Figura 13 – Radiações envolvidas para a contabilização do saldo de radiação. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	43
Figura 14 – Janela principal do SPRING, com a opção de importação de dados. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	45
Figura 15 – Coordenadas de canto do retângulo envolvente do SPRING. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	46
Figura 16 – Modelo estrutural do SPRING. Fonte: adaptado de Felgueiras (2006). . . . .	47
Figura 17 – Localização da área de estudo. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	49
Figura 18 – Localização dos perímetros irrigados dentro da área de estudo. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	51
Figura 19 – Climograma da cidade de Petrolina-PE. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	51
Figura 20 – Climograma da cidade de Juazeiro-BA. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	52

Figura 21 – Recorte do mapa de solos para a área de interesse nesta pesquisa. Fonte: EMBRAPA (2011). . . . .	53
Figura 22 – Diagrama dos passos para a implementação do SEBAL em ambiente livre. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	54
Figura 23 – (a) Mapa hipsométrico da área de estudo, (b) Histograma da imagem, (c) Perfis topográficos. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	56
Figura 24 – Mapa de uso e cobertura do solo da região do complexo irrigado Petrolina-PE/Juazeiro-BA. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	57
Figura 25 – Diagrama sintático de um <i>script</i> em LEGAL. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	61
Figura 26 – Diagrama sintático de uma declaração em LEGAL. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	61
Figura 27 – Diagrama sintático de uma declaração de variável de tabela. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	62
Figura 28 – Diagrama sintático de uma instanciação de variável de campos e cadastrais. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	63
Figura 29 – Diagrama sintático de uma instanciação de variáveis tabelas. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	64
Figura 30 – Diagrama sintático de uma instanciação de variáveis reais. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	65
Figura 31 – Diagrama sintático de uma operação. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	66
Figura 32 – Diagrama sintático de uma operação de forma detalhada. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	67
Figura 33 – Diagrama sintático de uma expressão real. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	68
Figura 34 – Diagrama sintático de uma expressão imagem. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	69
Figura 35 – Diagrama sintático de uma expressão MNT. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	69
Figura 36 – Diagrama sintático de uma expressão temática. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	70
Figura 37 – Diagrama sintático de uma expressão booleana. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	71
Figura 38 – Diagrama sintático de uma expressão zonal. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	72
Figura 39 – Diagrama sintático de uma expressão objeto. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	72

Figura 40 – Diagrama sintático do comando de controle Enquanto. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996). . . . .	73
Figura 41 – Diagrama metodológico da primeira etapa do algoritmo SEBAL, com as adições feitas na implementação para linguagem LEGAL em azul. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	75
Figura 42 – Diagrama metodológico do fluxo de calor sensível e suas interações. Fonte: adaptado de Nicacio (2008). . . . .	81
Figura 43 – Componentes do balanço de energia em região de fruticultura irrigada(imagem da esquerda) e solo exposto (imagem da direita). Fonte: adaptado de Nicacio (2008). Fonte das imagens: (EMBRAPA, 2015). . .	84
Figura 44 – Estimativa do albedo da superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	100
Figura 45 – Estimativa do albedo da superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	101
Figura 46 – Amostras de água, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	102
Figura 47 – Amostras de área irrigada, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . .	103
Figura 48 – Amostras de área urbana, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . .	103
Figura 49 – Amostras de solo exposto, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . .	104
Figura 50 – Estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	104
Figura 51 – Estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	105
Figura 52 – Amostras de água, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	106
Figura 53 – Amostras de área irrigada, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	106
Figura 54 – Amostras de área urbana, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	107
Figura 55 – Amostras de solo exposto, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	107

Figura 56 – Estimativa da temperatura da superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	108
Figura 57 – Estimativa da temperatura da superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	109
Figura 58 – Amostras de água, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	110
Figura 59 – Amostras de área irrigada, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	110
Figura 60 – Amostras de área urbana, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	111
Figura 61 – Amostras de solo exposto, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	111
Figura 62 – Estimativa do saldo de radiação à superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	112
Figura 63 – Estimativa do saldo de radiação à superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	113
Figura 64 – Amostras de água, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	113
Figura 65 – Amostras de área irrigada, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	114
Figura 66 – Amostras de área urbana, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	114
Figura 67 – Amostras de solo exposto, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	115
Figura 68 – Estimativa do fluxo de calor no solo para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	116
Figura 69 – Estimativa do fluxo de calor no solo para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	116
Figura 70 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	117
Figura 71 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	117
Figura 72 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	118
Figura 73 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	118

Figura 74 – Estimativa do fluxo de calor sensível para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	119
Figura 75 – Estimativa do fluxo de calor sensível para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	120
Figura 76 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	121
Figura 77 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	121
Figura 78 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	122
Figura 79 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	123
Figura 80 – Estimativa do fluxo de calor latente para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	124
Figura 81 – Estimativa do fluxo de calor latente para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	124
Figura 82 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	125
Figura 83 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	125
Figura 84 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	126
Figura 85 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	126
Figura 86 – Estimativa da evapotranspiração real horária para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	127
Figura 87 – Estimativa da evapotranspiração real horária para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	128
Figura 88 – Amostras de água, referentes a evapotranspiração real horária para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	129
Figura 89 – Amostras de área irrigada, referentes a evapotranspiração real horária para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor. . . . .	129

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de satélites atuais. . . . .	28
Tabela 2 – Resolução espacial de sensores orbitais e sua relação com a faixa de imageamento . . . . .	34
Tabela 3 – Características do satélite LANDSAT 5 . . . . .	40
Tabela 4 – Emissividades ( $\epsilon$ ) médias de alguns materiais terrestres . . . . .	42
Tabela 5 – IDH dos Municípios que compõe do Polo de Irrigação Petrolina-PE/Juazeiro-BA nos anos de 2000 e 2010 . . . . .	50
Tabela 6 – Valores dos parâmetros climáticos médios das duas maiores cidades da área de estudo . . . . .	52
Tabela 7 – Exemplo de caracteres da linguagem LEGAL . . . . .	60
Tabela 8 – Funções matemáticas implementadas em LEGAL . . . . .	68
Tabela 9 – Tabela de operadores de comparação e lógicos . . . . .	71
Tabela 10 – Valores das radiâncias mínimas e máximas e da irradiância solar espectral no tipo da atmosfera . . . . .	74

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
bits	<i>Binary digits</i>
CBERS	<i>China-Brazil Earth-Resources Satellite</i>
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
DGI	Divisão de Geração de Imagens
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
ERTS	<i>Earth Resources Technology Satellites</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Identificador
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LVAe	Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Número Digital
NDVI	Índice de Vegetação Diferença Normalizada
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>



OBT	Coordenação Geral de Observação da Terra
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PI	Plano de Informação
PVAe	Arginossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos
RBV	<i>Return Beam Vidicon</i>
REM	Radiação Eletromagnética
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SIG	Sistema de Geográfico de Informações
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SITIM	Sistema Interativo de Tratamento de Imagens Multiespectrais
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SUVALE	Superintendência do Vale do São Francisco
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Absortância
$\lambda$	Comprimento de onda
$\nu$	Frequência
$\rho$	Reflectância
$\tau$	Transmitância
$\varepsilon$	Emissividade
$c$	Velocidade da luz
$ha$	Hectare
$I$	Intensidade radiante
$K$	Graus Kelvin
$km$	Quilômetros
$m$	Metros
$mm$	Milímetro
$Rn$	Saldo de radiação
$W$	Watt
$\alpha_{(x,y)}$	Albedo da superfície
$\alpha_{pathrad}$	Radiação solar refletida pela atmosfera
$\alpha_{TOA}$	Albedo no topo da atmosfera
$\lambda ET$	Fluxo de calor latente
$\mu m$	Micrômetros
$\theta$	Ângulo solar zenital
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$Cp$	Calor específico

$dr$	Inverso do quadrado da distância Terra-Sol
$dT$	Diferença de temperatura
$ET_h$	Evapotranspiração real horária
$ET$	Evapotranspiração
$G$	Fluxo de calor no solo
$H$	Fluxo de calor sensível
$L_\lambda$	Radiância espectral
$L$	Coefficiente de Monin-Obukov
$rah$	Resistência aerodinâmica
$T_s$	Temperatura da superfície
$zom$	Coefficiente de rugosidade
$R_C \downarrow$	Radiação de onda curta incidente
$R_C \uparrow$	Radiação de onda curta emitida
$R_L \downarrow$	Radiação de onda longa incidente
$R_L \uparrow$	Radiação de onda longa emitida

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>	<b>26</b>
2.1.1	Perspectiva histórica	26
2.1.2	Definição de sensoriamento remoto	28
<b>2.2</b>	<b>Radiação Eletromagnética</b>	<b>29</b>
2.2.1	Modelo ondulatório	29
2.2.2	Modelo corpuscular	31
<b>2.3</b>	<b>Sistemas Orbitais e Sensores</b>	<b>33</b>
2.3.1	Resolução espacial	34
2.3.2	Resolução espectral	36
2.3.3	Resolução radiométrica	37
2.3.4	Resolução temporal	38
<b>2.4</b>	<b>Satélites da Série LANDSAT</b>	<b>38</b>
<b>2.5</b>	<b>Saldo de Radiação à Superfície</b>	<b>40</b>
2.5.1	Radiação de onda longa	40
2.5.2	Emissividade	41
2.5.3	Radiação de onda curta	41
2.5.4	Estimativa do saldo de radiação	42
<b>2.6</b>	<b>Evapotranspiração</b>	<b>44</b>
<b>2.7</b>	<b>SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas)</b>	<b>44</b>
2.7.1	Características técnicas do SPRING	45
2.7.2	Modelo de dados do SPRING	46
<b>2.8</b>	<b>SEBAL (<i>Surface Energy Balance for Land</i>)</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Polo de irrigação Petrolina-PE/Juazeiro-BA</b>	<b>48</b>
3.1.1	Clima	50
3.1.2	Solo	51
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo Numérico de Terreno (MNT)</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Mapa de Uso e Cobertura do Solo</b>	<b>57</b>

<b>4.3</b>	<b>Georreferenciamento da imagem orbital . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>Descrição da Linguagem Espacial para Geoprocessamento</b>	
	<b>Algébrico (LEGAL) . . . . .</b>	<b>59</b>
4.4.1	Estrutura de um <i>script</i> em LEGAL . . . . .	59
4.4.2	Diagramas sintáticos . . . . .	60
4.4.3	Declarações . . . . .	60
4.4.3.1	Declaração de variáveis de campos, cadastrais e objetos . . . . .	61
4.4.3.2	Declaração de variáveis de tabela . . . . .	62
4.4.4	Instanciação . . . . .	62
4.4.4.1	Instanciação de variáveis de campos e cadastrais . . . . .	62
4.4.4.2	Instanciação de variáveis tabelas . . . . .	64
4.4.4.3	Instanciação de variáveis reais . . . . .	65
4.4.5	Operações . . . . .	66
4.4.5.1	Expressões reais . . . . .	67
4.4.5.2	Expressões imagem . . . . .	68
4.4.5.3	Expressões MNT . . . . .	69
4.4.5.4	Expressões temáticas . . . . .	69
4.4.5.5	Expressões booleanas . . . . .	70
4.4.5.6	Expressões zonais . . . . .	71
4.4.5.7	Expressão objeto . . . . .	71
4.4.6	Comando de controle . . . . .	73
<b>4.5</b>	<b>Etapas para o cálculo do algoritmo SEBAL . . . . .</b>	<b>74</b>
4.5.1	Calibração radiométrica ( $L_\lambda$ ) . . . . .	74
4.5.2	Albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{TOA}$ ) e albedo da superfície ( $\alpha_{(x,y)}$ ) . . . . .	76
4.5.3	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) . . . . .	77
4.5.4	Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) . . . . .	77
4.5.5	Índice de área foliar (IAF) . . . . .	77
4.5.6	Emissividades ( $\varepsilon_{NB(x,y)}$ e $\varepsilon_{(x,y)}$ ) . . . . .	77
4.5.7	Temperatura da superfície ( $T_S$ ) . . . . .	78
4.5.8	Radiação de onda longa emitida ( $R_L \uparrow$ ) . . . . .	78
4.5.9	Radiação de onda longa incidente ( $R_L \downarrow$ ) . . . . .	79
4.5.10	Radiação de onda curta incidente ( $R_C \downarrow$ ) . . . . .	79
4.5.11	Saldo de radiação ( $R_n$ ) . . . . .	80
4.5.12	Fluxo de calor no solo (G) . . . . .	80
4.5.13	Fluxo de calor sensível (H) . . . . .	80
4.5.13.1	Determinação da diferença de temperatura (dT) . . . . .	84
4.5.13.2	Pixel quente . . . . .	85
4.5.13.3	Pixel frio . . . . .	85
4.5.13.4	Correção da estabilidade atmosférica . . . . .	85

4.5.14	Fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ) . . . . .	87
4.5.15	Evapotranspiração real horária . . . . .	88
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Implementação . . . . .</b>	<b>89</b>
5.1.1	Implementação do algoritmo SEBAL através da linguagem LEGAL . . . . .	89
5.1.1.1	Algoritmo SEBAL Rn e G parte 1 . . . . .	89
5.1.1.2	Algoritmo SEBAL fluxo sensível atmosfera neutra parte 2 . . . . .	93
5.1.1.3	Algoritmo SEBAL L monin obukhov parte 3 . . . . .	94
5.1.1.4	Algoritmo SEBAL correção de instabilidade atmosférica e Rah corrigido parte 4 . . . . .	96
5.1.1.5	Algoritmo SEBAL processo iterativo parte 5 . . . . .	97
5.1.1.6	Algoritmo SEBAL fluxo de calor latente, evapotranspiração real horária parte 6 . . . . .	98
<b>5.2</b>	<b>Aplicação . . . . .</b>	<b>100</b>
5.2.1	Estimativas dos fluxos de energia e evapotranspiração real horária na região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA por meio de sensoria- mento remoto . . . . .	100
5.2.1.1	Albedo da superfície . . . . .	100
5.2.1.2	Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) . . . . .	103
5.2.1.3	Temperatura da superfície . . . . .	108
5.2.1.4	Saldo de radiação . . . . .	111
5.2.1.5	Fluxo de calor no solo . . . . .	115
5.2.1.6	Fluxo de calor sensível (H) . . . . .	119
5.2.1.7	Fluxo de calor latente . . . . .	123
5.2.1.8	Evapotranspiração real horária . . . . .	127
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>130</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>132</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE A – SCRIPT 1 - SALDO DE RADIAÇÃO À FLUXO DE CALOR NO SOLO . . . . .</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE B – SCRIPT 2 - FLUXO DE CALOR SENSÍVEL (ATMOSFERA NEUTRA . . . . .</b>	<b>146</b>
	<b>APÊNDICE C – SCRIPT 3 - L MONIN IBUKHOV . . . . .</b>	<b>148</b>

APÊNDICE D – <i>SCRIPT</i> 4 - $R_{ah}$ CORRIGIDO - CORREÇÃO DE INSTABILIDADE ATMOSFÉRICA . . . . .	151
APÊNDICE E – <i>SCRIPT</i> 5 - PROCESSO ITERATIVO - FLUXO DE CALOR SENSÍVEL . . . . .	153
APÊNDICE F – <i>SCRIPT</i> 6 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL HO- RÁRIA . . . . .	157
<b>ANEXOS</b>	<b>158</b>
ANEXO A – TABELA DA DISTÂNCIA TERRA-SOL . . . . .	159

# 1 INTRODUÇÃO

Em pleno século XXI, um dos maiores e mais desafiadores problemas da humanidade é garantir o abastecimento de água potável para os mais de 7 bilhões de pessoas que habitam o planeta Terra. Deste montante mais de 200 milhões são cidadãos brasileiros (IBGE, 2015b), que no decorrer dos anos vem sofrendo com a falta de água; principalmente nas regiões semiáridas do Brasil onde o abastecimento afeta até a manutenção de tarefas cotidianas.

Embora a produção quase que totalitária de alimentos no mundo se desenvolva em sistema de sequeiro, a necessidade da utilização de irrigação para a produção de alimentos vem crescendo em ritmo acelerado, já alcançando 70 % da água doce consumida na Terra (FERERES; SORIANO, 2007).

A forma como a água é utilizando em regime de irrigação, depende das necessidades hídricas da cultura, de qual método será adotado para este procedimento e de fatores mais preponderantes, como os climáticos: temperatura, vento, radiação solar e umidade relativa do ar; que irão interferir na evapotranspiração da vegetação.

O bom entendimento e conhecimento das necessidades hídricas das mais variadas espécies vegetais, que podem ser estimados através do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) e da evapotranspiração de referência, são de primordial importância para se alcançar um gerenciamento hídrico, não só de culturas irrigadas, mas também de bacias hidrográficas (GONDIM; TEIXEIRA; BARBOSA, 2005).

Para controlar a demanda hídrica dentro de uma cultura irrigada, é necessário o desenvolvimento de métodos que possam calcular as reais necessidades hídricas de uma determinada cultura. Para tal processo, é necessário estimar a quantidade de água perdida pela planta para a atmosfera pela evapotranspiração (ET) e a quantidade de água infiltrada no solo.

Nas últimas décadas, a utilização de imagens advindas de sensores orbitais vem se firmando como um instrumento de suma importância, não só na identificação de áreas em processo degradativos, erosivos, dentre outros, mas também em estudos sobre o balanço de energia e água. As imagens orbitais passaram a representar uma das maneiras mais adequadas de monitoramento, tanto em escala local como global. Isto posto, a estimativa da evapotranspiração em escala regional, utilizando como base imagens de sensores orbitais e algoritmos que trabalhem para a conversão de números digitais (ND) em radiância e reflectância, permitindo chegar em medidas de radiação e fluxos, alcançando assim a estimativa da evapotranspiração, representa uma grandiosa contribuição para o monitoramento do ciclo hidrológico (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005).



O ciclo hidrológico afeta fortemente os mais variados aspectos da vida dos seres humanos, desde a produtividade agrícola, utilização de energia, controle de cheias, suprimento de água para a indústria e população, manejo da flora e da fauna, dentre outros. Tendo em vista os fatos apresentados, modelos que representem de forma consistente o ciclo hidrológico podem, efetivamente, contribuir para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. De uma maneira geral, as modificações advindas de causas naturais ou antrópicas favorecem flutuações em diversas componentes do ciclo hidrológico, tais como precipitação, fortemente influenciada por fenômenos de acoplamento oceano-atmosfera, a exemplo da umidade do solo e balanço de energia, fundamentalmente dependente dos processos de trocas radiativas entre a atmosfera e a superfície.

O SEBAL (*Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSSEN et al., 1998a), segundo Weligepolage (2005), é um algoritmo semi-empírico que fomenta a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície (fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e latente) baseado em alguns dados locais e medições provenientes de faixas espectrais de sensores abordo de satélites. O modelo SEBAL ganhou bastante destaque na comunidade científica mundial, pois vem apresentando em diversos testes ao redor do mundo valores bastante precisos nas suas estimativas (BASTIAANSSEN et al., 1998a); (NICACIO, 2008); (GOMES, 2009); (FOLHES, 2007); (SANTOS; FONTANA; ALVES, 2010).

O algoritmo SEBAL, foi desenvolvido pelo Professor Doutor Wim G. M. Bastiaanssen em 1995 (BASTIAANSSEN et al., 1998a); (BASTIAANSSEN et al., 1998b) e validado em diversos ecossistemas ao redor do mundo, dentre eles: Egito, Espanha, França, Itália, Argentina, China, Zâmbia, Etiópia, Estados Unidos, Brasil, dentre outros (TASUMI, 2003). Segundo Meireles (2007), é necessário que o sensor orbital possua uma resolução espectral que abranja os canais do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, para que possa servir de entrada para os processos existentes no algoritmo.

Apesar da existência de modelos de grande utilização mundial, a exemplo do já citado SEBAL, na quase totalidade dos estudos realizados, o algoritmo é escrito e executado através de *softwares* proprietários. Tal fator implica em um grande impedimento na utilização do modelo por diversos pesquisadores, principalmente, os que atuam em instituições com menor recurso financeiro disponível, tendo em vista que as empresas detentoras desses softwares cobram preços exorbitantes pelas suas licenças de uso.

No Brasil, os softwares voltados ao processamento de imagem chegaram ao país através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, quando em 1974, foi adquirido o sistema chamado “IMAGE-100”, ao custo de US\$ 1 milhão, sendo por muito tempo o único sistema de processamento digital de imagens de satélite em operação no Brasil. Em 1984 foi criada a Divisão de Processamento de Imagens (DPI), desempenhando um excelente papel, já em 1986 a DPI lançou o Sistema Interativo de Tratamento de Imagens Multiespectrais – SITIM, em paralelo a este projeto foi também desenvolvido um

sistema de informação geográfica (SIG), denominado SGI, que foi integrado ao processador de imagem, dando origem a um sistema que passou a ser conhecido como SITIM/SGI. Já em 1991 iniciou-se o desenvolvimento do Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING (CAMARA et al., 1996), a priori um *software* não comercial, porém com código fechado (INPE, 2015).

A partir de 2011, o INPE libera o código fonte do SPRING, permitindo assim aos usuários as 4 liberdades básicas de um SPRING agora *software* livre: liberdade de executar o programa para qualquer propósito, liberdade de estudar como o programa funciona, podendo adaptá-lo as suas necessidades, liberdade de redistribuir cópias e a liberdade de aperfeiçoar o programa.

## 1.1 Objetivos

A presente pesquisa tem como objetivo geral implementar o algoritmo SEBAL em ambiente livre através da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) presente no *software* SPRING, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tendo como etapas principais:

1. implementação do SEBAL em ambiente livre, utilizando-se da linguagem LEGAL;
2. mapeamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), do albedo da superfície, da temperatura da superfície, do saldo de radiação;
3. mapeamento da evapotranspiração real horária;
4. avaliação dos resultados gerados através de estudo de caso na região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ápice desta pesquisa encontra-se na implementação do algoritmo SEBAL, utilizando-se a linguagem LEGAL, presente no *software* livre SPRING, para o mapeamento de todas as componentes do balanço de energia à superfície e a evapotranspiração real horária, utilizando-se de sensor multiespectral de baixa resolução espacial. Com o intuito de oferecer subsídios para fundamentar o entendimento desta pesquisa, esta seção abrange os aspectos conceituais envolvidos no sensoriamento remoto, no balanço de energia e na evapotranspiração, bem como conceitos sobre o *software* livre SPRING.

### 2.1 Sensoriamento Remoto

#### 2.1.1 Perspectiva histórica

O início do sensoriamento remoto advém a invenção da câmera fotográfica, sendo este o primeiro instrumento utilizado, perdurando até os dias atuais, onde ainda se utiliza de câmeras para tomada de fotos sejam aéreas ou orbitais, como as capturadas pela câmera pancromática russa KVR-1000, que se encontra a bordo dos satélites Cosmos a uma altitude de 200 km, obtendo fotografias de 2 a 3 m de resolução espacial (SOVINFORMSPUTNIKE, 2015).

O pioneirismo na utilização de tecnologias de alto nível, está quase que totalitariamente voltado a aplicações de uso militar, o sensoriamento remoto a princípio também tinha esta finalidade. Segundo Figueiredo (2010), no século passado, uma pequena e leve câmera fotográfica foi desenvolvida para fins militares. Este equipamento, era carregado com pequenos rolos de filme e possuía disparador automático, sendo fixado ao peito de pombos-correio, que eram levados para locais estratégicos, onde era sabido que em seu retorno a origem, sobrevoariam regiões inimigas (Figura 1), as fotografias obtidas formavam um valioso acervo informativo, para o reconhecimento da localização e disposição de infraestrutura das forças militares inimigas.

Com a evolução dos processos militares, houve a gradativa substituição dos pombos-correio por balões amarrados a cabos que eram erguidos sem tripulação, somente acoplados com diversas câmaras que tomavam fotos de diversas posições, auxiliando assim no reconhecimento do território inimigo. Posteriormente aviões foram sendo utilizados para tomada de fotografias para uso das forças armadas e atualmente aviões ultra modernos acoplado por diversos sensores e voando a grandes altitudes vem trabalhando no processo de espionagem militar.

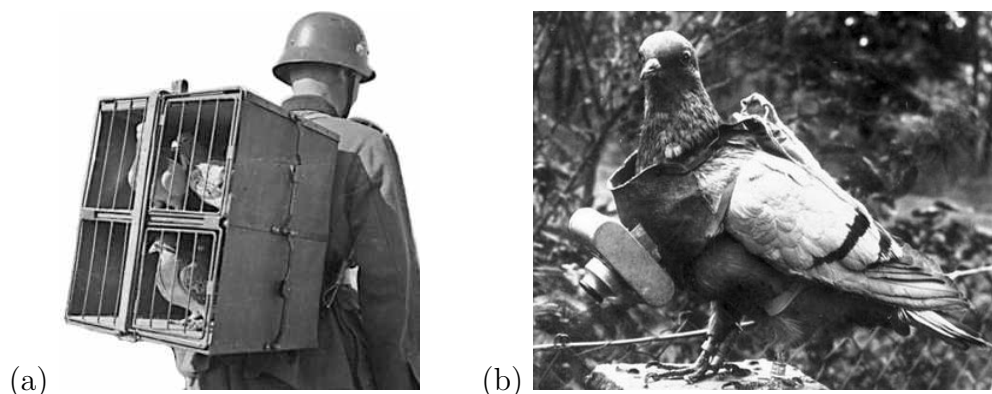


Figura 1 – (a) Soldado carregando os pombos para o campo de batalha, (b) Pombo-correio com máquina acoplada ao peito. Fonte: Cabral (2015)

A revolução do sensoriamento remoto como uma ciência utilizada mundialmente e não só por militares, aconteceu no início da década de 70, com a colocação em órbita do ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellites*), dando início a série LANDSAT (Figura 2). Os satélites tem grandes benefícios com relação a outras formas de obtenção de informações, apesar do custo para o seu desenvolvimento e lançamento, são equipamentos que ficam anos orbitando em torno da Terra, trabalhando em um processo contínuo de tomadas de imagens da superfície terrestre, que são coletadas 24 horas por dia, até o final de sua vida útil.



Figura 2 – Imagem do satélite ERTS-1. Fonte: USGS (2015b)

Segundo Figueiredo (2010), o avanço alcançado pelo sensoriamento remoto, esta baseado na evolução de quatro grandes segmentos tecnológicos: os sensores, que são responsáveis pela coleta das imagens; o sistema de telemetria, responsável pela transmissão dos dados adquiridos pelo satélite até as estações terrestres; o sistema de processamento, conjunto de hardwares e softwares responsável pelo processamento dos dados e os lançadores, que consistem dos sistemas de foguetes e propulsores que colocam os satélites em órbita.

Na atualidade existem diversas séries de satélite em operação, podendo ser citados entre eles: o LANDSAT, RapidEye, WorldView, Pléiades, CBERS, Ikonos, QuickBird, Meteosat, dentre outros. Os satélites possuem diversas funções desde o monitoramento e

levantamento de recursos naturais terrestre, monitoramento de obras e construções, estudos climáticos e atmosféricos, como os satélite de uso meteorológico, etc. Para conseguir atender a todas estas necessidades de uso, cada satélite possui características distintas que lhe permite captar as informações necessárias a sua aplicação, alguns exemplos se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Características de satélites atuais.

Nome do satélite	Bandas espectrais	Resolução espacial	Resolução temporal
LANDSAT 8	Coastal aerosol	30 m	16 dias
	Blue	30 m	
	Green	30 m	
	Red	30 m	
	Near Infrared	30 m	
	SWIR 1	30 m	
	SWIR 2	30 m	
	Panchromatic	15 m	
	Cirrus	30 m	
	Thermal Infrared (TIRS) 1	100 m	
Thermal Infrared (TIRS) 2	100 m		
RapidEye	Blue	6,5 m	Diariamente fora do nadir / 5,5 dias (no nadir)
	Green		
	Red		
	Red-Edge		
	Infravermelho próximo		
WorldView 2	Vermelho	2 m	1,1 dias 30° off nadir / 3,7 dias 20° off nadir
	Verde		
	Azul		
	Infravermelho		
	Azul costeiro		
	Amarela		
	Vermelho limítrofe		
	Infravermelho-2		
Pancromática	0,5 m	Diária	
Pancromático	0,5 m		
Azul	2 m		
Verde			
Vermelho			
Infravermelho próximo			

Fonte: USGS (2015a), Antunes, Debiasi e Siqueira (2014), GlobalGeo (2015), EngeSat (2015)

### 2.1.2 Definição de sensoriamento remoto

A definição mais clássica e conhecida do sensoriamento remoto, trata como sendo uma técnica utilizada para a obtenção de informações sobre os alvos, através de instrumentos que não têm contato físico com os objetos investigados (AVERY; BERLIN, 1992). Analisando o assunto abordado no tópico anterior, esta definição serve para designar a então nova tecnologia criada, que era capaz de obter imagens da superfície terrestre a distâncias remotas, seja por pombos ou balões.

Isto posto, esta definição clássica, somente leva em consideração que o sensor deve estar a uma distância no objeto a ser estudo, todavia a definição de sensoriamento remoto, deve partir de uma concepção um pouco mais científica, a qual necessita, segundo Meneses et al. (2012), seguir alguns preceitos:

- i **exigência:** para que a interação e captura da informação ocorra por meio dos sensores, é necessária a ausência de matéria no espaço entre o objeto e o sensor;
- ii **consequência:** a informação do objeto é possível de ser transportada pelo espaço vazio;
- iii **processo:** a comunicação objeto/sensor só é possível devido a radiação eletromagnética, que é a única forma de energia capaz de se transportar pelo espaço.

Tomando como base estes preceitos e conceitos, o sensoriamento remoto de forma mais científica, pode ser definido como: A ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENESES et al., 2012).

Ratificando a definição anterior, fica explícito que o sensoriamento remoto, só pode assim ser denominado, quando existir a relação de obtenção da imagem com a detecção de energia eletromagnética. Ou seja, nenhum outro tipo de sensor que obtenha imagens que não seja pelo meio descrito, pode ser denominada como sensoriamento remoto.

É notório a partir do exposto neste tópico que só se pode compreender os processos envolvidos no sensoriamento remoto, a partir do conhecimento do que é a radiação eletromagnética (REM).

## 2.2 Radiação Eletromagnética

O conhecimento da radiação eletromagnética, parte do entendimento da dualidade de comportamento presente em sua natureza, é ter clareza que a REM se propaga no vácuo, e se comporta ao mesmo tempo como uma forma de onda e uma forma de energia. A partir desde conceito é que se consegue entender e explicar todas as características observadas em estudos com imagens advindas do sensoriamento remoto. As formulações para esta dualidade, partem dos modelos denominados de ondulatória (onda) e corpuscular (energia).

### 2.2.1 Modelo ondulatório

O modelo ondulatório, segundo as teorias de Maxwell (1881), é formulado partindo do princípio que uma partícula carregada eletricamente, gera em torno de si um campo elétrico, que por sua vez, devido a agitação da partícula gera um campo magnético. A vibração alcançada pela partícula, estimula que ambos os campos, elétrico e magnético, atuem vibrando ortogonalmente entre si e que suas amplitudes se mantenham iguais. No momento que esta partícula sofre aceleração, esta perturbação causada entre os campos se

propaga em direção ortogonal à direção de ambos os campos; a esta perturbação do campo elétrico (E) e do campos magnético (M) se denomina onda eletromagnética (Figura 3) Pode-se então definir a REM como uma oscilação dos campos E e M, seguindo um padrão harmônico, ou seja, as ondas possuem espaçamento repetitivo no decorrer do tempo. A propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo ocorre a aproximadamente 300.000 km/s (velocidade da luz).

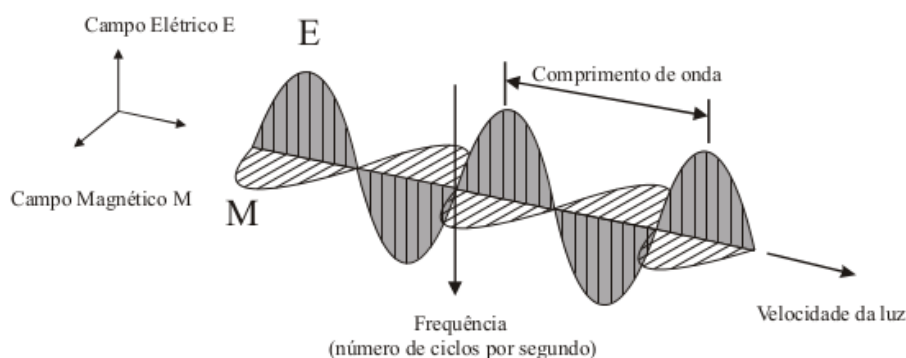
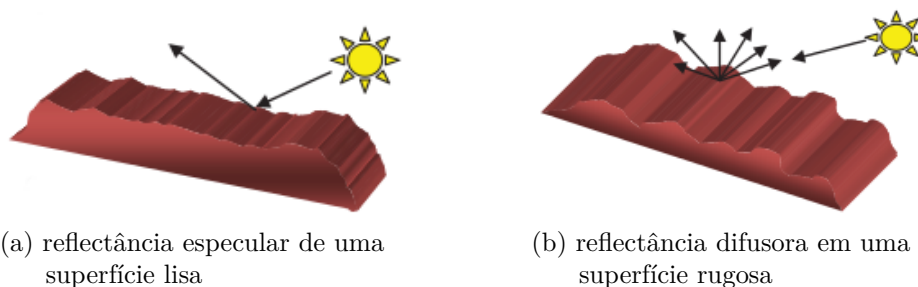


Figura 3 – Propagação da radiação eletromagnética, em função dos campos elétrico (E) e magnético (M). Fonte: Meneses et al. (2012)

Por consenso no sensoriamento remoto, nos referimos à radiação eletromagnética através do seu comprimento de onda e não da sua frequência, utilizando-se, mais comumente, da unidade de medida micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). A lei do comportamento ondulatório é expressa de forma matemática, entendendo que o comprimento de onda  $\lambda$  é igual a velocidade da luz ( $c$ ) sobre a frequência  $\nu$ .

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

Segundo Meneses et al. (2012), não se pode falar do modelo ondulatório sem entender a interação macroscópica da radiação eletromagnética com os objetos, basicamente, tal interação é a resposta da intensidade com que um objeto reflete a REM em razão do tamanho da onda e a textura da superfície estudada (Figura 4).



(a) reflectância especular de uma superfície lisa

(b) reflectância difusora em uma superfície rugosa

Figura 4 – Reflectâncias especular e difusora . Fonte: Meneses et al. (2012)

Na Figura 4a, é notado a comportamento da reflectância em uma superfície de textura lisa, enquanto que na Figura 4b tem-se o comportamento da reflectância em uma superfície rugosa. No sensoriamento remoto, pode-se classificar em dois tipos as texturas que ocorrem na superfície: especular ou difusora, respectivamente. Tais superfícies são modelos ideais, o que não é observado na prática. Superfícies reais misturam reflectância especular com difusora (Figura 5)

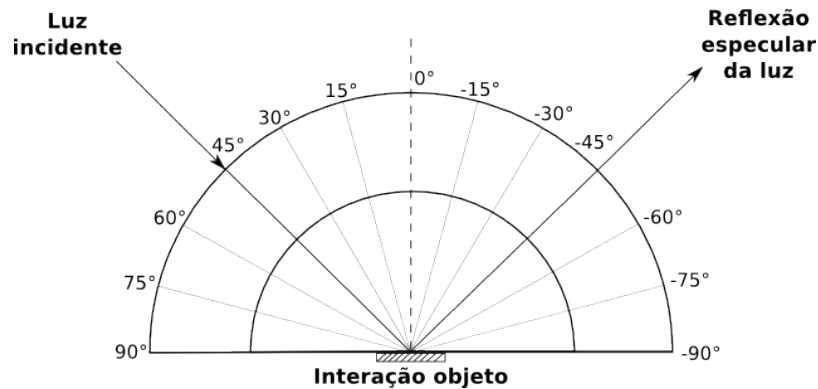


Figura 5 – Representação de superfície real, interação em conjunto de reflectância especular e difusora. Fonte: elaborado pelo autor.

## 2.2.2 Modelo corpuscular

Como o modelo ondulatório está mais vinculado as interações macroscópicas da radiação eletromagnética com os objetos, tal modelo falha em explicar alguns fenômenos importantes que acontecem quando a radiação eletromagnética interage com a matéria.

No século XVII, Isaac Newton, propôs uma teoria que tentava explicar o que era a luz, esta teoria ficou conhecida como modelo corpuscular, que entendia que a luz era constituída de pequenas partículas, que eram emitidas por fontes luminosas. Planck (1901) observou que a transferência de energia de um objeto para outro se dava em quantidades fixas e discretas, à qual denominou de fótons. O fóton é a partícula elementar que media a força eletromagnética. Segundo Meneses et al. (2012), é a forma física de um quantum, que é a partícula básica estudada em mecânica quântica.

O nome corpuscular, origina-se do entendimento que os fótons são corpúsculos de energia sem matéria. Segundo o modelo corpuscular pode-se definir que a REM é uma forma dinâmica de energia, se manifestando somente quando interagi com a matéria. A quantidade de energia ( $E$ ) presente em um quantum é diretamente proporcional à frequência ( $\nu$ ) da radiação (MENESES et al., 2012), conforme expresso na equação 2.2.

$$E = h \cdot \nu \quad (2.2)$$



Onde,  $E$  é a energia,  $h$  é a constante de Planck ( $6,624 \cdot 10^{-34}$  Joules·seg) e  $\nu$  é a frequência.

Substituindo-se  $\nu$  por  $\lambda$  a partir da equação 2.1 do modelo ondulatório, obtêm-se que:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Analisando a equação 2.3, nota-se que o fóton de energia ( $E$ ) é inversamente proporcional ao comprimento de onda  $\lambda$ , logo, comprimentos de onda da REM menores transportam maiores quantidades de energia, conseqüentemente, os comprimentos de onda maiores transportam menores quantidade de energia.

Isto posto no modelo corpuscular, é necessário ter o entendimento que existe a interação microscópica da radiação eletromagnética com o objeto estudado, na medida a REM atinge uma superfície, ela irá interagir através da troca de energia que ela carrega e a energia contida nos átomos e moléculas presentes na matéria. Para que isso ocorra é necessário que o objeto que está sofrendo a interação absorva um pouco da radiação eletromagnética que está incidindo sobre o mesmo, provocando assim uma excitação nos átomos, fazendo que o elétron migre de uma órbita de menor para uma de maior energia, acontecendo assim a liberação do fóton (Figura 6).

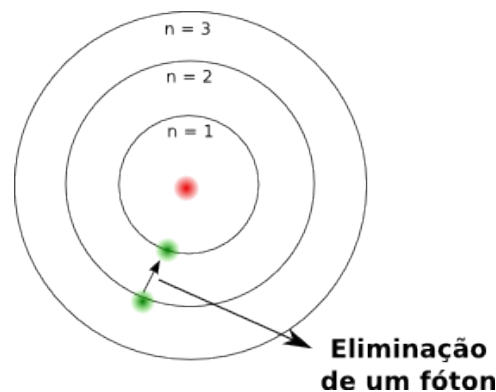


Figura 6 – Representação da eliminação de um fóton, provocada pela mudança de órbita de um elétron. Fonte: elaborado pelo autor.

Esta absorção de energia pela matéria é de extrema importância no sensoriamento remoto, uma vez que o estudo dessa radiação juntamente com a radiação refletida irá proporcionar definir as assinaturas espectrais dos diversos alvos existentes na superfície terrestre.

## 2.3 Sistemas Orbitais e Sensores

Como já citado anteriormente, existem hoje em atuação diversas constelações de satélites que orbitam em torno da Terra, capturando e enviando as informações obtidas sobre a atmosfera e a superfície terrestre. Para conseguir detectar a radiação eletromagnética refletiva ou emitida pelos objetos em Terra, estes sistemas orbitais possuem modernos sensores capazes de captar a REM e transformar a energia transportada pela onda, em um pulso eletrônico que é proporcional à intensidade da energia, a este pulso eletrônico dar-se o nome de número digital (ND).

Os sistemas sensores podem ser divididos segundo a fonte de radiação eletromagnética que se utilizam, caso a REM seja obtida através do Sol, ou seja, por meio natural, o sistema sensor é denominado passivo (Figura 7a). Entretanto, se o sensor tem capacidade de produzir sua própria REM, ele é denominado ativo (Figura 7b), tais sensores tem uma vantagem em relação aos anteriores, como sua REM é produzida através de radares acoplados aos satélites, esta radiação atravessa as nuvens, podendo assim ser operado independente das condições atmosféricas.

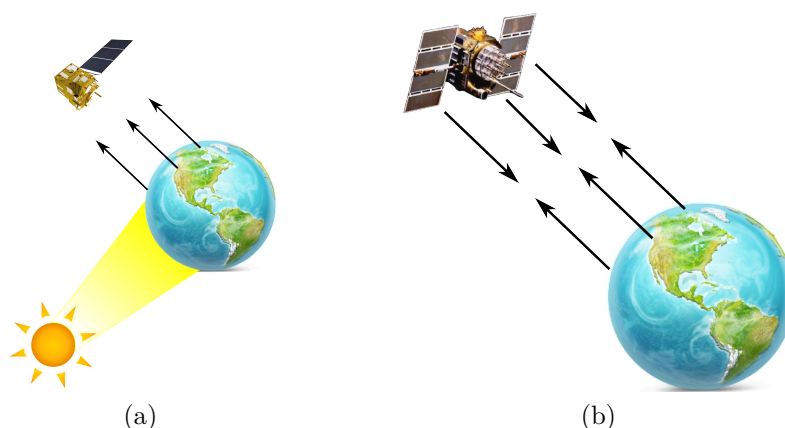


Figura 7 – (a) Representação de um sensor passivo, (b) Representação de um sensor ativo. Fonte: elaborado pelo autor.

Durante o percurso que a radiação eletromagnética percorre até sua incidência à superfície, esta, segundo Rabus et al. (2003), passa por diversos processos de atenuação, sendo eles: a absorção, a reflexão e o espalhamento. O processo de absorção atmosférica refere-se a atenuação de parte da radiação incidente através da interação e absorção por parte de nuvens e partículas de poeira que se encontrem em suspensão na atmosfera (RABUS et al., 2003). A reflexão atmosférica segundo Silva, Lopes e Azevedo (2005), é o processo pela qual a radiação eletromagnética é refletida por um objeto, a exemplo um topo de nuvem ou neblina, e retorna ao espaço sem nem mesmo interagir com a superfície terrestre. Já o espalhamento ainda segundo Silva, Lopes e Azevedo (2005), corresponde a mudança de forma aleatório da direção de propagação da radiação eletromagnética devido a processos de interação elástica com algumas componentes da atmosfera.

Nas aplicações de sensoriamento remoto, além da escolha por sensores ativos ou passivos, e do entendimento que a radiação sofre diversos processos atenuantes, outro ponto extremamente importante, segundo Meneses et al. (2012), é o conhecimentos sobre as diferentes formas de medições, sendo elas:

- i : pela área do campo de visada do sensor;
- ii : pelo comprimento de onda que o sensor pode captar;
- iii : pelos valores numéricos da medida da radiância do alvo;
- iv : recorrência de tomada de uma imagem referente a um mesmo lugar.

Tais medições são descritas na literatura em termos de resoluções, e são denominadas respectivamente de resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal. São analisadas em conjunto, e auxiliam na escolha de um determinado tipo de sensor, a depender do resultado que se pretenda alcançar.

### 2.3.1 Resolução espacial

Segundo Florenzano (2002), a resolução espacial refere-se a capacidade que o sensor possui de distinguir o menor tamanho individual de área imageada da superfície terrestre. A esta menor parcela imageada dar-se o nome de pixel. É extremamente importante, pois, é a partir da resolução espacial que se pode determinar o menor objeto identificado ao analisar uma imagem.

O pixel é uma unidade indivisível, sendo portanto impossível de se identificar qualquer alvo que possua tamanho inferior ao mesmo, tendo em vista que seu valor é uma interação de todos os feixes de luz que interagiram com esta unidade de área (Figura 8). A determinação da resolução espacial está diretamente ligada ao campo de visada no sensor, ou seja, sensores com faixas de imageamento maiores terão uma resolução espacial menor, enquanto os sensores com uma faixa de imageamento menor, terão resoluções espaciais maiores (Tabela 2).

Tabela 2 – Resolução espacial de sensores orbitais e sua relação com a faixa de imageamento

Satélite	Sensor	Largura da faixa imageada	Resolução espacial
Landsat 5	TM	185 km	30 m
RapidEye	RapidEye-5	77 km	6,5 m
CBERS 4	PAN	60 km	5 m
Quick Bird	PAN	16,8 km	0,60 m

Fonte: USGS (2015a), Antunes, Debiasi e Siqueira (2014)

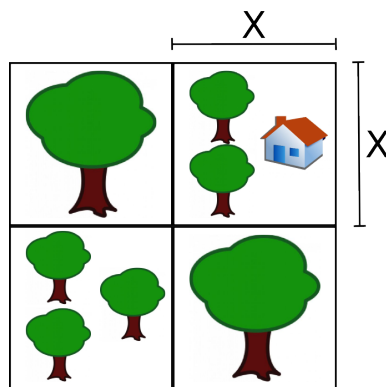


Figura 8 – Representação de objetos dentro de um pixel, quando mais de um objeto está presente, o valor captado é a soma de todas as interações e não do objeto individual. Fonte: elaborado pelo autor.

As resoluções espaciais dos sensores abordo dos satélites, podem ser divididas em baixa, média e alta resolução (Figura 9), a depender no tamanho do pixel. A escolha por qual tipo de resolução optar, permeia a necessidade da pesquisa, o capital existente para investir e os resultados esperados, somente analisando estes fatores é possível escolher a resolução espacial mais adequada.

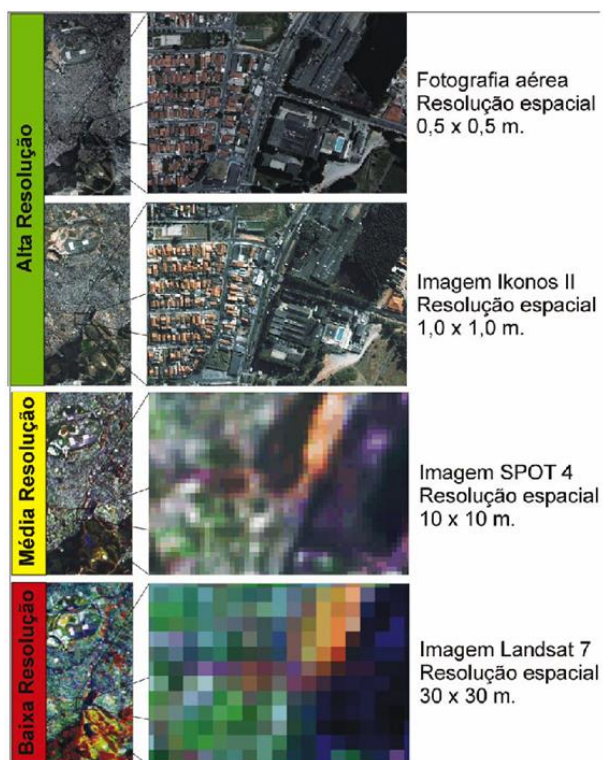


Figura 9 – Representação de diferentes tipos de resolução espacial e seus respectivos satélites. Fonte: Melo (2002).

### 2.3.2 Resolução espectral

A resolução espectral esta diretamente ligada com uma das propriedades mais importantes que estão associadas ao sensoriamento remoto, que é a obtenção simultânea de múltiplas bandas espectrais; estas bandas auxiliam no entendimento do comportamento espectral dos alvos. Estão presentes na superfície da Terra os mais diversificados tipos de alvos, tais como: água, solo exposto, cerâmica, asfalto, dentre outros. Após a entrada da radiação eletromagnética na atmosfera terrestre ela começa um processo de interação com alvos, sejam eles pertencentes a atmosfera ou a superfície, no momento que a REM incide sobre um alvo, três fenômenos físico-químicos podem ocorrer: absorção, reflexão e transmissão (Figura 10).

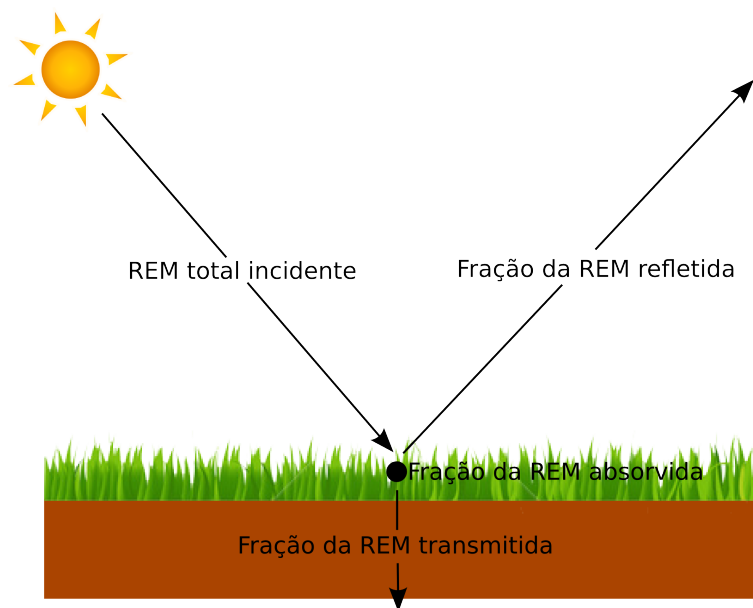


Figura 10 – Representação dos fenômenos de absorção, reflexão e transmissão. Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 10, pode-se observar três propriedades do sensoriamento remoto, que envolve as frações da radiação eletromagnética absorvida, refletida e transmitida em razão da radiação total incidente, sendo elas:

$$\frac{\text{fração absorvida}}{\text{REM total incidente}} = \alpha \quad (2.4)$$

$$\frac{\text{fração refletida}}{\text{REM total incidente}} = \rho \quad (2.5)$$

$$\frac{\text{fração transmitida}}{\text{REM total incidente}} = \tau \quad (2.6)$$

Onde  $\alpha$  corresponde a absorvância;  $\rho$  a refletância e  $\tau$  a transmitância. Através da análise dessas propriedades se consegue extrair as curvas espectrais dos alvos que se quer

pesquisar e observar o comportamento de cada um em um determinado comprimento de onda (Figura 11)

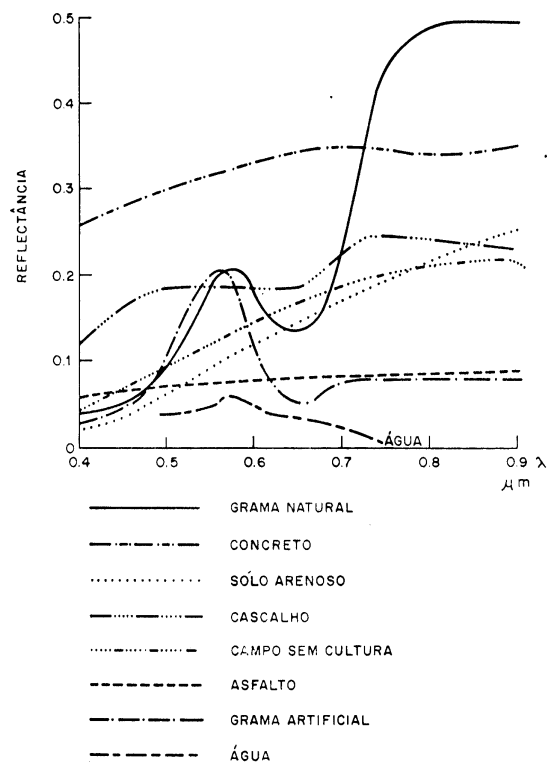


Figura 11 – Assinatura espectral de alguns alvos encontrados na Terra. Fonte: INPE (2015).

Diante do exposto, a resolução espectral, segundo Figueiredo (2010), está relacionada com as faixas espectrais captadas pelo sensor, quanto mais estreitas as faixas e quanto maior o número de bandas captadas maior a resolução espectral. Meneses et al. (2012) ratificam esta definição e complementa que o termo resolução espectral, esta diretamente ligado a três parâmetros de medida do sensor:

- i : número de bandas que o sensor possui;
- ii : largura em comprimento de onda das bandas;
- iii : posição que as bandas se localizam dentro do espectro eletromagnético.

Ainda em conformidade com Meneses et al. (2012), um sensor tem melhor resolução espectral se possuir maior número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimento de onda.

### 2.3.3 Resolução radiométrica

Segundo Schowengerdt (1983), a resolução radiométrica faz referência à capacidade do sensor em distinguir as variações da radiância espectral recebida pelo mesmo. A esta

valor numérico que representa a intensidade de radiância proveniente do alvo estudado, que corresponde ao pixel, denomina-se de nível de cinza, que são expressos pela quantidade de *bits*. Para se conhecer quantos níveis de cinza uma imagem possui, basta elevar 2 ao número de bits da imagem ( $2^8 = 256$ ), o valor alcançado será os níveis de cinza (Figura 12) (MELO, 2002).

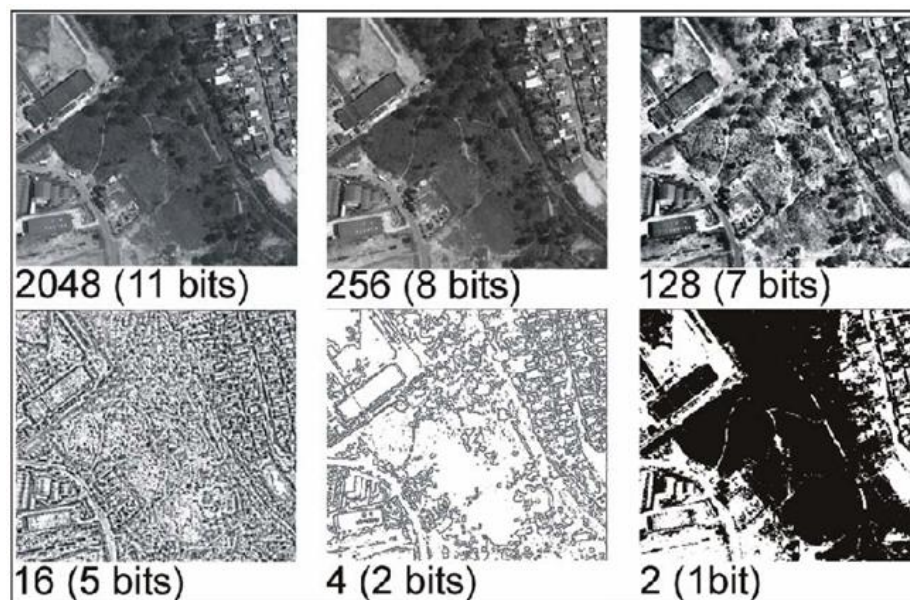


Figura 12 – Representação das diferentes radiações radiométricas. Fonte: Melo (2002).

Observa-se que na Figura 12, a imagem de 11 *bits* ( $2^{11} = 2048$ ) tem detalhamento visual superior as imagens de menores *bits*, isto posto, fica explícito que as imagens com maior quantidade de bits possuem resolução radiométrica superior. Segundo Meneses et al. (2012), a maioria dos sensores multiespectrais com resolução espacial de 10 a 30 metros trabalham com resoluções radiométricas de 8 *bits*, ou seja, discriminam até 256 valores de radiância por banda espectral. Já os sensores de alta resolução espacial, com tamanho de pixel 1 metro ou menor, possuem resolução radiométrica de 10 ou 11 *bits*.

### 2.3.4 Resolução temporal

Refere-se ao tempo de revisita de um sensor sobre uma mesma área, sendo de fundamental importância para acompanhar e/ou detectar as evoluções e/ou modificações que ocorrem na superfície terrestre.

## 2.4 Satélites da Série LANDSAT

A série dos satélites LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*) teve início no ano de 1972, quando a Agência Espacial Americana, órgão setorial do governo norte Americano, deu início as missões de observações orbital da Terra, denominando a primeira experiência

neste nível de ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), tendo seu nome alterado três anos depois para LANDSAT, o principal objetivo da missão era obter um mapeamento multiespectral da superfície terrestre (USGS, 2015c).

A missão teve seu ponto inicial com o lançamento do ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite 1*), posteriormente chamado de LANDSAT 1, tinha acoplado dois diferentes instrumentos sensores: as câmeras RBV (*Return Beam Vidicon*) e MSS (*Multispectral Scanner System*).

Posteriormente houve mais dois lançamentos, um ocorrendo em 1975 e outro em 1978, que corresponderam, respectivamente, ao LANDSAT 2 e 3, os dois satélites tinham bastante similaridade com seu antecessor, diferenciando apenas o LANDSAT 3, onde houve um aumento do número de bandas espectrais oferecidas pelo sensor MSS.

O LANDSAT 4 foi marcado pela substituição do RBV pelo TM (*Thematic Mapper*), tendo seu lançamento sido realizado em 1982. Dois anos depois seu sucessor (LANDSAT 5) foi colocado em órbita, apresentando os mesmos modelos de sensores que o LANDSAT 4 possuía, em 1995 o sensor MSS, apresentou falhas e deixou de enviar dados para as estações terrestres, entre outubro e novembro de 2011 o TM também começou a apresentar defeito não sendo mais possível se estabelecer conexão.

O LANDSAT 6 foi desenvolvido com um sensor muito similar ao TM, porém o mesmo vinha acrescido de um novo sensor com resolução espacial de 15 metros, denominado de ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), por motivos de falhas no lançamento este satélite não conseguiu entrar em órbita. Em 1999 foi aperfeiçoado o sensor ETM, denominando-se ETM+. Este sensor foi acoplado a bordo do LANDSAT 7, que operou até 2003, apresentando problemas de *hardware* que impediram seu pleno funcionamento (USGS, 2015c).

No dia 11 de fevereiro de 2013 um novo satélite da série foi lançado (LANDSAT 8), começando a transmitir suas primeiras imagens em 18 de março do mesmo ano; sua órbita final somente foi alcançada dia 12 de abril de 2013, orbitando a 705 km de altitude. O LANDSAT 8 apresenta melhorias de resolução radiométrica (16 *bits*); resolução espacial (possui uma banda pancromática de 15 metros e demais de 100 m); resolução espectral (11 bandas espectrais e uma máscara de nuvens), houve alteração nos sensores acoplados, possuindo agora o OLI (*Operational Land Imager*), com as bandas multiespectral e o pancromática, e o sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Apesar do significativo avanço, por se tratar de um satélite relativamente recente, ainda faltam pesquisas que atribuam valores de calibração para que possam ser determinadas diversas variáveis de superfície.

Isto posto, o LANDSAT 5 apesar de desativado, foi o utilizado nesta pesquisa, pois possui coeficientes já estudados e disseminados no meio técnico-científico e possui características que não deixam a desejar no objetivo deste trabalho, como pode ser



observado na tabela 3.

Tabela 3 – Características do satélite LANDSAT 5

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial (m)
TM ( <i>Thematic Mapper</i> )	Banda 1 – Azul	0,45 – 0,52	30
	Banda 2 – Verde	0,52 – 0,60	
	Banda 3 – Vermelho	0,63 – 0,69	
	Banda 4 – Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90	
	Banda 5 – Infravermelho Próximo	1,55 – 1,75	120
	Banda 6 – Infravermelho Termal	10,40 – 12,50	
	Banda 7 – Infravermelho Médio	2,08 – 2,35	
		<b>Resolução Temporal</b>	<b>Área Imageada</b>
	16 dias	185 km	8 bits

Fonte: USGS (2015c)

## 2.5 Saldo de Radiação à Superfície

A principal fonte de energia natural que esta envolvida diretamente em diversos processos que ocorrem na superfície da Terra, é a o Sol. A estrela central do nosso sistema solar é considerado um corpo negro, com emissão máxima aproximada de  $0,48 \mu\text{m}$  em relação a uma temperatura de 6000 K. Segundo Iqbal (2012), em sua maioria, a radiação solar está na faixa de  $0,15 \mu\text{m}$  e  $4,00 \mu\text{m}$ , enquanto a radiação terrestre varia entre  $3,00 \mu\text{m}$  e  $100 \mu\text{m}$ . Tanto os espectros da radiação solar (onda curta) como os da terrestre (onda longa), podem ser comparáveis ao de um corpo negro, logo, suas propriedades podem ser obtidas pelas leis que regem os processos em um corpo negro.

### 2.5.1 Radiação de onda longa

A radiação de onda longa pode ser dividida em duas componentes: a radiação de onda longa incidente ( $R_L \downarrow$ ), que é o resultado da interação da radiação eletromagnética solar e os componentes atmosféricos; segundo Arya (2001),  $\text{CO}_2$ , vapor de água e nuvens, são os maiores contribuintes para a radiação de ondas longas incidentes e a radiação de onda longa emitida ( $R_L \uparrow$ ), que é resultado da interação da radiação de onda longa incidente com a superfície.

O cálculo da radiação de onda longa é a componente mais difícil de ser medida, pois, com os instrumentos disponíveis atualmente as medições não alcançam precisão satisfatória (MEIRELES, 2007). Os métodos mais precisos para o cálculo indireto desta variável, são baseados em dados do perfil de umidade e de temperatura do ar, dados estes que nem sempre se encontram disponíveis. Por tal motivo, se têm utilizado modelos baseados na lei de Stefan-Boltzmann. Um dos termos inseridos nesta lei é a emissividade, que pode ser melhor compreendida no tópico a seguir.

## 2.5.2 Emissividade

A emissividade pode ser compreendida como a relação entre a radiância real emitida pelo corpo real e pelo corpo negro a uma mesma temperatura mesma área (Equação 2.7).

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiância emitida pelo corpo real}}{\text{Radiância emitida pelo corpo negro}} \quad (2.7)$$

Onde  $\varepsilon$  é a emissividade, que pode variar entre 0 e 1, por definição, a emissividade do corpo negro é igual a 1, para todos os comprimentos de onda.

Segundo Perin (2009), a emissividade depende de alguns fatores como a temperatura do corpo negro, o comprimento de onda e o ângulo de emissão, sendo frequentemente medida experimentalmente na direção normal da superfície, e como função do comprimento de onda. Pela forma mais geral da Lei de Kirchoff (Equação 2.8), a relação entre a emissividade e a absorptância é válida sem restrições.

$$\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) \quad (2.8)$$

Vaughan, Calvin e Taranik (2003), baseando-se na Lei de Kirchoff, deduziram que, se existe a relação entre a emissividade e a absorptância, e sabendo que o objeto tem transmitância zero à radiação termal, logo a intensidade radiante é:

$$I = \rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} \quad (2.9)$$

Analisando a equação 2.9, conclui-se que a energia que emana dos objetos tem uma relação entre a reflectância ( $\rho_{\lambda}$ ) e a emissividade ( $\varepsilon_{\lambda}$ ), ou seja, se a reflectância é alta a emissividade é baixa, alguns exemplos dessa relação podem ser vistos na tabela 4.

## 2.5.3 Radiação de onda curta

A fonte de radiação de onda curta incidente à superfície ( $R_C \downarrow$ ) é advinda do Sol, segundo Iqbal (2012), compreende a faixa de 0,15 a 4,0  $\mu\text{m}$ , e duas componentes: a radiação de onda curta direta e a radiação de onda curta difusa, sendo ambas medidas por meio de piranômetros.

Parte da radiação de onda curta que chega à superfície é refletida, a esta parcela denomina-se radiação de onda curta refletida pela superfície ( $R_C \uparrow$ ). Esta radiação é determinada pela diferença entre os fluxos de radiação incidente e refletida, sendo assim, depende diretamente da radiação solar global e do albedo da superfície ( $\alpha_{sup}$ ). Segundo Nicacio (2008) é importante frisar que o termo albedo é utilizado para denominar apenas a reflexão de radiação de onda curta.

Tabela 4 – Emissividades ( $\varepsilon$ ) médias de alguns materiais terrestres

Material	Emissividade ( $\varepsilon$ )
Água destilada	0,99
Água	0,92 - 0,98
Gelo seco	0,97 - 0,98
Vegetação verde	0,96 - 0,99
Vegetação seca	0,88 - 0,94
Gramma	0,97
Solo úmido	0,95 - 0,98
Solo seco	0,92 - 0,94
Neve	0,83 - 0,85
Areia	0,90
Asfalto	0,95
Basalto	0,95
Granito	0,86
Dunito	0,78
Metal polido	0,16 - 0,21
Alumínio polido	0,55
Ouro polido	0,02 - 0,03
Aço inoxidável	0,16

Fonte: Sabins e Lulla (1987), Lillesand, Kiefer e Chipman (2008)

O albedo é uma componente muito importante, pois, variações bruscas em sua estimativa influenciam diretamente no balanço de radiação, que por sua vez, influencia nos processos de aquecimento do ar e do solo e na evapotranspiração (NICACIO, 2008). Sofre variações a depender das características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital.

Segundo Bastiaanssen et al. (1998a), uma maneira de se estimar esta variável é através do uso de satélite que medem a reflectância espectral em bandas estreitas no topo da atmosfera, podendo ser realizada a conversão dessas reflectâncias em uma única banda. Tal procedimento exige a ponderação de um fator de proporcionalidade, sendo feito, obtêm-se o albedo planetário através das interações dessa ponderação, assim, o albedo da superfície é estimado tomando como base o albedo planetário e a transmitância atmosférica.

#### 2.5.4 Estimativa do saldo de radiação

O saldo de radiação ( $R_n$ ) é definido, segundo Nicacio (2008), como a energia radiativa disponível à superfície terrestre, sendo resultado de uma contabilização das radiações de ondas curtas e longas, sendo estas incidentes, refletidas ou emitidas (Figura 13). Esta contabilização pode ser calculada conforme a equação 2.10.

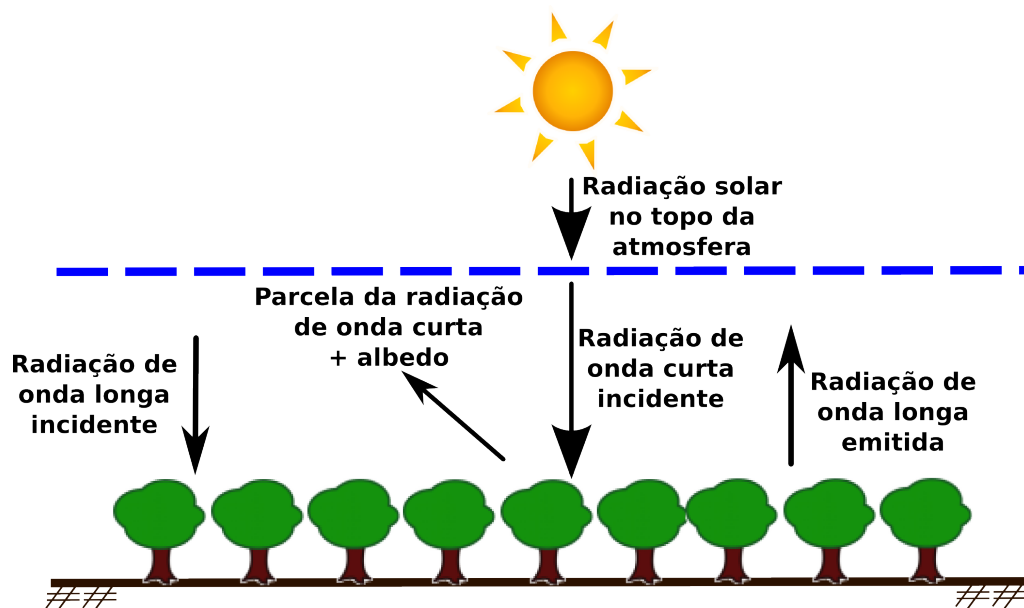


Figura 13 – Radiações envolvidas para a contabilização do saldo de radiação. Fonte: elaborado pelo autor.

$$R_n = (1 - \alpha_{SUP}) \cdot R_C \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon) \cdot R_L \downarrow \quad (2.10)$$

Onde,  $R_n$  é o saldo de radiação à superfície;  $R_C \downarrow$  é a radiação de ondas curtas incidente à superfície;  $R_L \downarrow$  é a radiação de onda longa incidente à superfície;  $R_L \uparrow$  é a radiação de onda longa refletida e emitida pela superfície, sendo todas expressas em  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\alpha_{SUP}$ , é o albedo da superfície e  $\varepsilon$  a emissividade, ambos com unidades de medidas adimensionais [-].

Como já mencionado nos tópicos anteriores, a radiação de onda longa é advinda da Terra, enquanto que a radiação de onda curta vem do Sol, logo, pode-se entender que durante o dia a radiação de onda curta é predominante, ao anoitecer esta mesma radiação de torna nula. Isto posto, conclui-se que o saldo de radiação no período diurno tem valores positivos, tendo em vista que a superfície recebe mais radiação do que perde, no período noturno o saldo é negativo. Entretanto, o total diário do  $R_n$  é positivo (ALLEN, 2000).

O saldo de radiação é uma variável que pode ser medida através da utilização de um equipamento denominado saldo radiômetro ou através de formulações empíricas. Devido as limitações de se obter a medição desta componente, tanto em escala espacial. Como temporal, o sensoriamento remoto surge como um ciência e um mecanismo promissor para se estimar tal variável.

O SEBAL é um importante exemplo neste contexto, e tem como principal vantagem ter processos que necessitam de poucos dados meteorológicos e ser baseado fundamentalmente em imagens de satélites.

## 2.6 Evapotranspiração

Segundo Gomes (2009), evapotranspiração (ET) pode ser definida como sendo a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície com algum grau de cobertura vegetal, levando em consideração um determinado período de tempo.

Partindo deste conceito, entende-se que a ET como a combinação de dois processos, a evaporação, de qualquer meio que possua água, seja no solo ou rios, oceanos, dentre outras fontes, e o processo de transpiração das plantas. É através da medida da evapotranspiração que pode-se compreender as perdas de água no sistema solo-planta-atmosfera. Segundo Silva, Lopes e Azevedo (2005), a evapotranspiração é um processo que depende primordialmente da quantidade de energia solar que chega a superfície terrestre, tendo em vista que exige um alto gasto de energia.

A evapotranspiração é uma variável de extrema importância em estudos hidrológicos e atmosféricos. Tal variável pode ser medida através de lisímetros e controle de umidade do solo, sendo estes processos onerosos e pontuais, a depender da localização dos equipamentos. Diferente disso, o sensoriamento remoto permite a estimativa espacializada da evapotranspiração, a depender da interação com as características biofísicas encontradas em cada pixel.

## 2.7 SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas)

A história do SPRING começa quase que igualmente com a criação da Divisão de Processamento de Imagens (DPI), vinculada a Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Em 1984 a DPI foi criada, em 1986 já se começou os trabalhos com alguns sistemas voltados a tratamento de imagens e em 1991 começou o desenvolvimento do Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING).

Segundo Felgueiras (2006), o começo do desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) próprio, foi impulsionado pela busca de soluções de problemas específicos encontrados na realidade brasileira, concomitantemente, a existência da necessidade de domínio tecnológico desse tipo de ferramental para enfrentar os desafios futuros.

Atualmente o SPRING se encontra em sua versão 5.2.7, possuindo arquiteturas de 32 e 64 bits (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>), sendo disponível em quatro idiomas: Português, Inglês, Espanhol e Francês e roda em sistemas operacionais Windows e em algumas distribuições do Linux. De acordo com Felgueiras (2006), é utilizado por dezenas de instituições governamentais e não governamentais, empresas públicas e privadas, tanto

no Brasil como em outros países.

O SPRING é um SIG em seu estado da arte, com funções de processamento de imagem, funcionalidade de entrada de saída de dados geoespaciais, tratamento de dados numéricos, redes e cadastrais, permitindo a análise espacial de forma individual ou multinível. É composto por três módulos o *software* SPRING propriamente dito, o IMPIMA, que permite o intercâmbio de dados para diversos formatos e o SCARTA módulo que contém a função de um editor de produtos cartográficos com os dados armazenados no banco de dados do SPRING, a partir da versão 5.0 passou a integrar o próprio *software*.

### 2.7.1 Características técnicas do SPRING

O SPRING é um *software* desenvolvido em C++, compatível com os sistemas operacionais Windows e Ubuntu. No final de 2006, com o intuito de se conseguir lançar sempre as versões dos dois sistemas operacionais de forma concomitante, começou-se a utilização do pacote de interface gráfica QT, tendo em vista que tal pacote possibilita o desenvolvimento de interfaces que rodam de forma semelhante em ambos os ambientes.

O *software* é baseado no sistema de abertura de janelas, trazendo assim uma interação total com o usuário final, visto que, para cada processo solicitado, é aberta uma janela solicitando que se dê entrada nos valores necessários para a execução da função (Figura 14). Para cada janela aberta é disponibilizada a opção de executar a função escolhida ou fechar a janela e retornar a tela principal do SPRING.

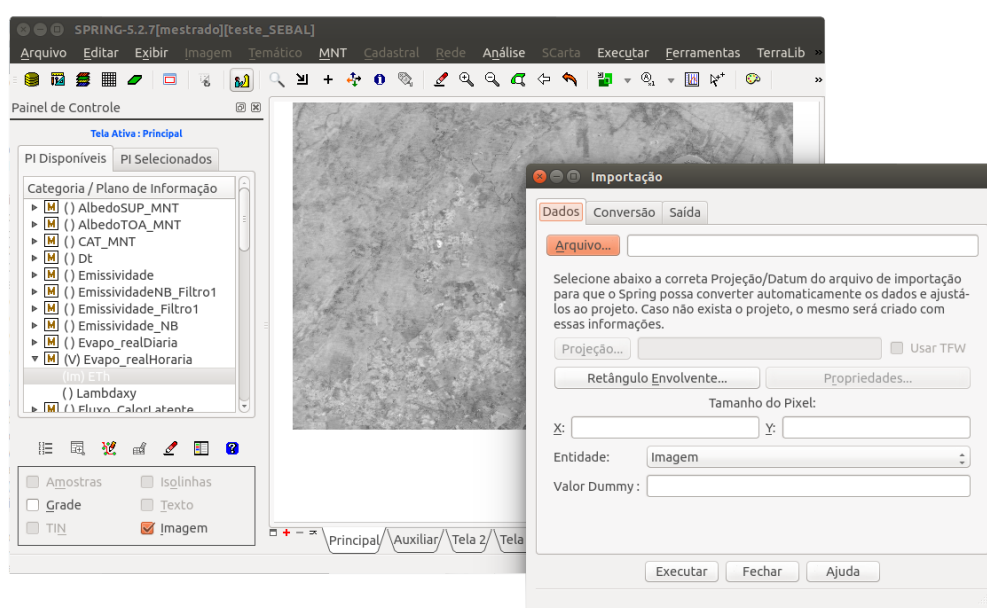


Figura 14 – Janela principal do SPRING, com a opção de importação de dados. Fonte: elaborado pelo autor.

## 2.7.2 Modelo de dados do SPRING

A primeira etapa do modelo estrutural do SPRING é a criação de um banco de dados, este banco necessita ser salvo em um diretório de preferência do usuário e vai se utilizar de alguns dos Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) disponíveis atualmente, tais como: PostgreSQL, MySQL, SQLite, dentre outros, a depender da escolha do usuário. Este gerenciador será o responsável por gerir todas as tabelas usadas pelo sistema.

Um banco de dados pode ser composto por diversos projetos, cada um tendo nome, projeção e retângulo envolvente próprios, este retângulo compreende um área com coordenadas de canto delimitadas, no SPRING especificamente, correspondentes ao canto inferior esquerdo e superior direito, conforme a Figura 15. Os projetos são compostos pelas categorias de dados aceitas pelo SPRING, sendo elas: Imagem, MNT, Temática, Cadastral e Rede; cada uma com sua especificação.

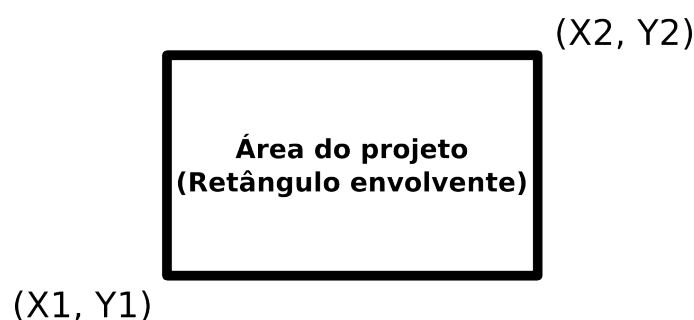


Figura 15 – Coordenadas de canto do retângulo envolvente do SPRING. Fonte: elaborado pelo autor.

Estas categorias irão ser vinculadas aos planos de informação (PI), logo, cada projeto pode ter mais de um PI, porém um PI só irá corresponder a uma das categorias já citadas, todos os PIs possuem interação entre si, permitindo que um seja utilizado para gerar novas informações utilizando-se de outro. A Figura 16, mostra um esquema com o modelo estrutural do SPRING.

## 2.8 SEBAL (*Surface Energy Balance for Land*)

O algoritmo SEBAL, foi desenvolvido pelo Professor Doutor Wim G. M. Bastiaanssen em 1995 (Bastiaanssen et al. (1998a), Bastiaanssen et al. (1998b)), sendo um dos mais destacados algoritmos para estudos de fluxo de calor na superfície. É um algoritmo semi-empírico, que tem como dados de entrada imagens de satélite, que devem abranger as faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e termal. O algoritmo promove assim a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície baseando-se em poucos dados locais e diversas estimativas espectrais advindas de satélite (WELIGEPOLAGE, 2005).

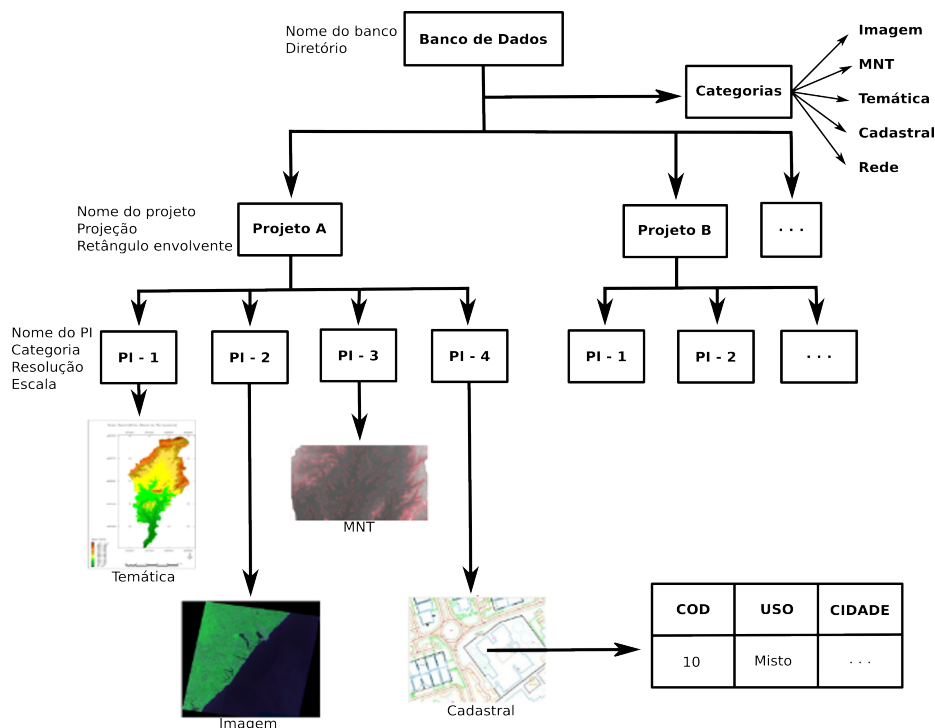


Figura 16 – Modelo estrutural do SPRING. Fonte: adaptado de Felgueiras (2006).

Apesar do SEBAL ser um algoritmo baseado em formulações empíricas, existem diversas validações ao redor do mundo baseados em experimentos de campo que tem mostrado que o erro relativo na fração evaporativa alcança 20 %, 10 % e 1 % nas escalas respectivas de 1 km, 5 km e 100km (BASTIAANSEN, 2000).

O *Surface Energy Balance for Land* (SEBAL) é um algoritmo amplamente aplicado na agricultura irrigada, devido a sua viabilidade na determinação do consumo hídrico de culturas, através da estimativa da ET. Vem sendo estudado e validado em diversos lugares ao redor do mundo, tais como: Sri Lanka (Bastiaanssen e Chandrapala (2003), Hemakumara, Chandrapala e Moene (2003)); Estados Unidos (Allen et al. (2005), Tasumi et al. (2005), Tasumi e Allen (2007)), Filipinas (Hafeez et al. (2002)).

No Brasil vem sendo bastante aplicado, principalmente na área correspondente ao complexo irrigado localizado no sertão dos estados da Bahia e Pernambuco, às margens do Rio São Francisco, nas cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, cidades estas onde a grande maioria de perímetros irrigados se localiza (Silva, Lopes e Azevedo (2005), Pace (2004), Feitosa (2005), Nicacio (2008)).

O SEBAL tem como principais componentes estimados, o albedo da superfície; as emissividades; índices de vegetação; temperatura da superfície; saldo de radiação; fluxo de calor no solo; calor sensível; latente e a evapotranspiração. Vale salientar que em estudo realizados por Bastiaanssen et al. (2003) e Mohamed, Bastiaanssen e Savenije (2004), observou-se que pode-se estimar também a umidade do solo, tendo em vista que se trata de uma derivação da fração evaporativa.



## 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi escolhida, tendo em vista ser uma área composta por diversos perímetros irrigados e de grande importância nacional, tanto socialmente como economicamente. Além de se localizar em uma região semiárida do Brasil, que como já citado anteriormente, é uma área que necessita de maiores estudos e interferência de planejamento e gestão.

### 3.1 Polo de irrigação Petrolina-PE/Juazeiro-BA

A área de estudo é definida por áreas parciais de quatro municípios, sendo dois localizados no estado de Pernambuco (Petrolina e Lagoa Grande), e dois no estado da Bahia (Juazeiro e Casa Nova). Localizado no Nordeste do Brasil, como apresentado na Figura 17, é o polo de irrigação mais desenvolvido dentre todos os existentes no Vale do São Francisco, apresentando um enorme potencial para a agricultura irrigada.

O polo de irrigação de Petrolina/Juazeiro está localizado as margens do Rio São Francisco, em pleno sertão nordestino, entre as coordenadas de canto inferior esquerdo 309615,5273 m E e 8961420,6157 m N e superior direito 378735,5273 m E e 9006810,6157 m N, tendo como referência a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul 2000 (SIRGAS2000), pertencendo ao fuso 24 S.

Analisando do ponto de vista socioeconômico, um dos fatores mais limitantes para o desenvolvimento de regiões semiáridas é a má distribuição pluviométrica associada as elevadas temperaturas, acarretando em perda de produção e assim contribuindo de forma direta para o aumento da miséria e do desemprego na região.

Tendo em vista os fatores citados, ao longo de anos vem se buscando implantar polos de agricultura irrigada buscando assim suprir a carência da chuva e desenvolver as regiões atingidas. No começo da década de 60, começou-se os primeiros estudos para implantação de perímetros irrigados na região estudada, sendo conduzido sob os cuidados da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), posteriormente expandidos pela Superintendência do Vale do São Francisco (SUVALE) e pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), dando assim origem a diversos outros projetos implantados.

O polo de irrigação de Petrolina-PE/Juazeiro-BA é composto por oito municípios sendo quatro deles localizados no estado de Pernambuco (Petrolina, Santa Maria da Boa Vista, Lagoa Grande e Orocó) e quatro localizados no estado da Bahia (Juazeiro, Casa

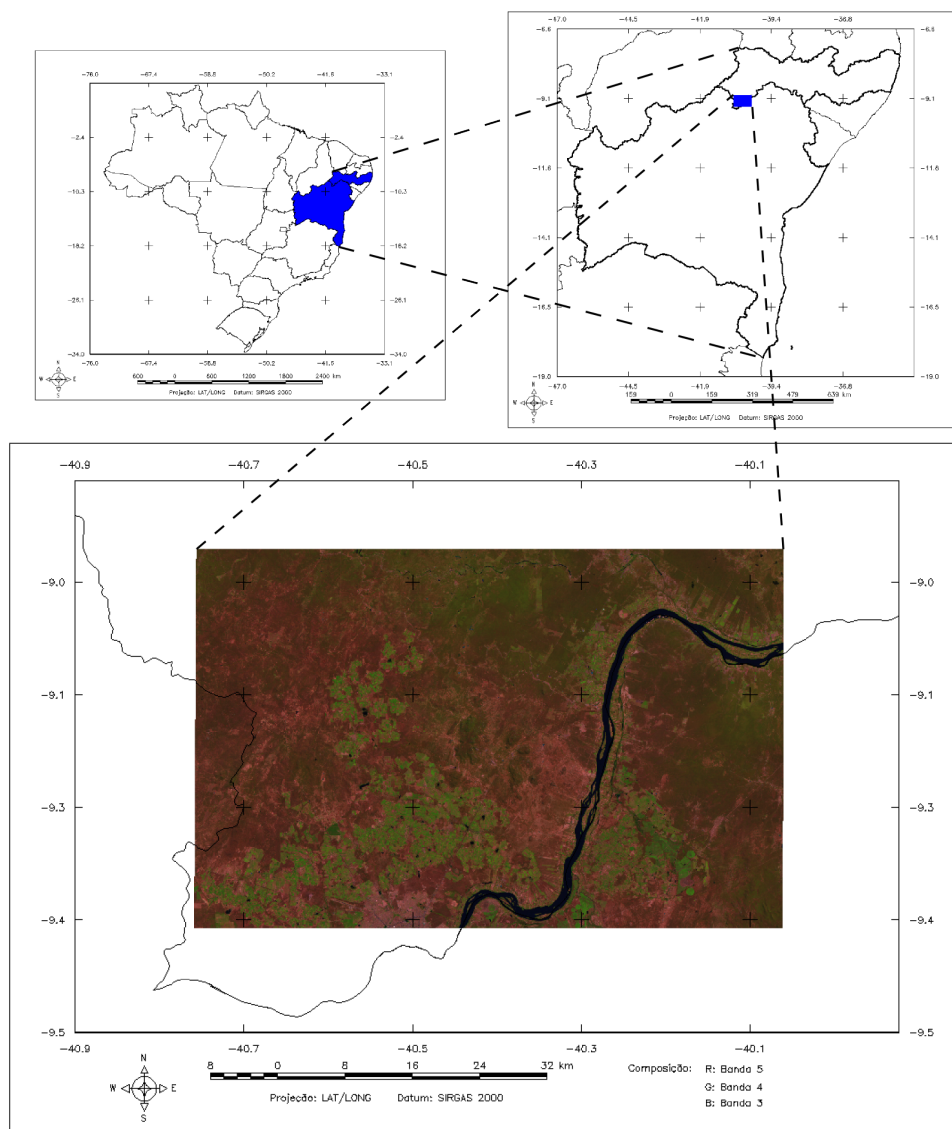


Figura 17 – Localização da área de estudo. Fonte: elaborado pelo autor.

Nova, Curaçá e Sobradinho), juntos os oito municípios ocupam uma área territorial de 33.432,443 km<sup>2</sup> (IBGE, 2015a) e somam uma população total, segundo o censo de 2010, equivalente a 686.410 habitantes (IBGE, 2010), sendo 71,67 % concentrada nas cidades de Petrolina e Juazeiro.

Segundo o IBGE (2012a), os oito municípios que compõe o polo possuem juntos um produto interno bruto de 7.665.766 mil reais, sendo 49,40 % deste valor pertencente a Petrolina e 27,85 % a Juazeiro. O crescimento dos municípios da região também é comprovado quando se analisa o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) referentes aos anos de 2000 e 2010 (Tabela 5), percebe-se claramente o crescimento do índice no decorrer dos dez anos, período este que houve o fortalecimento dos perímetros irrigados na região.

Segundo dados da CODEVASF (2015), o polo de Petrolina-PE/Juazeiro-BA é composto por dez perímetros irrigados, localizando-se quatro no estado de Pernambuco,

Tabela 5 – IDH dos Municípios que compõe do Polo de Irrigação Petrolina-PE/Juazeiro-BA nos anos de 2000 e 2010

Municípios	2000	2010	Aumento (%)
<b>Petrolina-PE</b>	0,580	0,697	16,79
<b>Santa Maria da Boa Vista-PE</b>	0,468	0,590	20,68
<b>Lagoa Grande-PE</b>	0,441	0,597	26,13
<b>Orocó-PE</b>	0,474	0,610	22,29
<b>Juazeiro-BA</b>	0,531	0,677	21,56
<b>Casa Nova-BA</b>	0,373	0,570	34,56
<b>Curaçá-BA</b>	0,424	0,581	27,02
<b>Sobradinho-BA</b>	0,524	0,631	16,96

Fonte: IBGE (2012b)

dos quais três estão em atividade (Bebedouro, Senador Nilo Coelho e sua extensão Maria Tereza) e um em fase de implementação (Pontal), e os seis restantes localizam-se no estado da Bahia, estando cinco em produção (Curaçá, Mandacaru, Maniçoba, Salitre – Etapa I e Tourão) e a segundo etapa do Salitre em implementação. Dentre os dez citados o maior e que mais se destaca é o perímetro de Senador Nilo Coelho, que possui 16.257 ha em seu complexo principal e 4.374 ha em sua extensão denominada Maria Tereza, somados totalizam um área de alta produção irrigada com 18.563 ha.

Na área utilizada nesta pesquisa, encontram-se cinco dos dez projetos que totalizam o polo, dos quais três estão situados com a totalidade de suas áreas e dois contribuem com um percentual de área, conforme mostrado na Figura 18.

### 3.1.1 Clima

Conforme mencionado anteriormente, a área de estudo abrange parcialmente quatro municípios, sendo os mais representativos em área os municípios de Petrolina e Juazeiro. Esta região do submédio São Francisco apresenta um clima quente semiárido (EMBRAPA, 2015).

Analisando uma série climatológica (1975-2014), com dados das duas estações agrometeorológicas localizadas nas cidades supra citadas (Figuras 19 e 20) adquiridos junto a Embrapa Semiárido, percebe-se que o período chuvoso tem início em novembro e vai até abril, sendo o mês de março o de maior contribuição para o total pluviométrico, alcançando das duas estações médias superiores a 100 mm. A estação mais seca ocorre entre maio e outubro, onde a pluviometria não ultrapassa os 25 mm.

Analisando a tabela 6, que mostra as médias anuais de algumas variáveis meteorológicas, os valores de Petrolina e Juazeiro, como já esperado, estão condizentes com regiões semiáridas, temperaturas médias em torno de 26°C, precipitação média anual inferior a

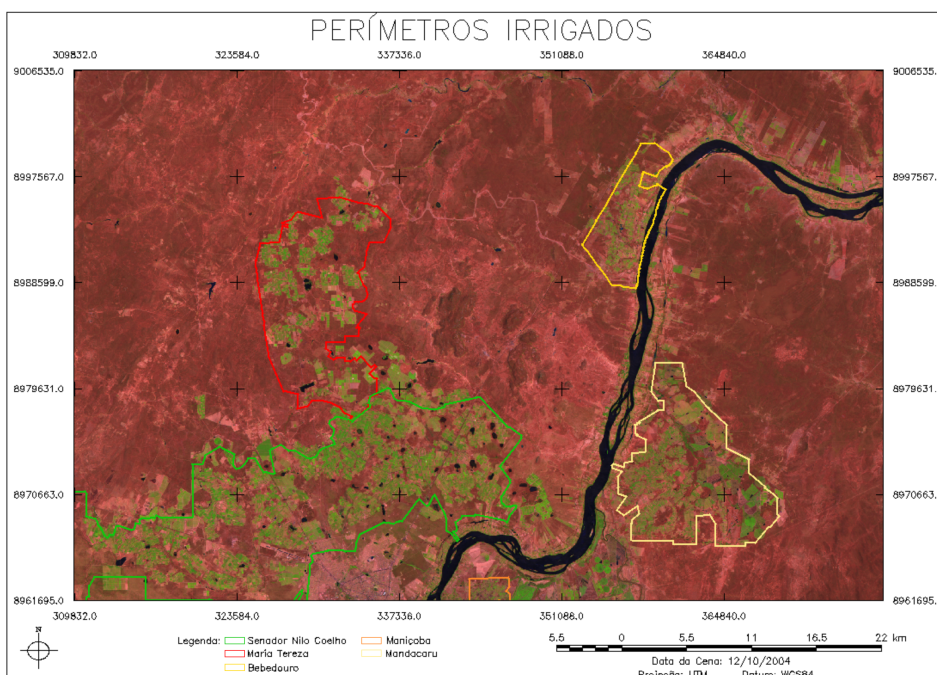


Figura 18 – Localização dos perímetros irrigados dentro da área de estudo. Fonte: elaborado pelo autor.

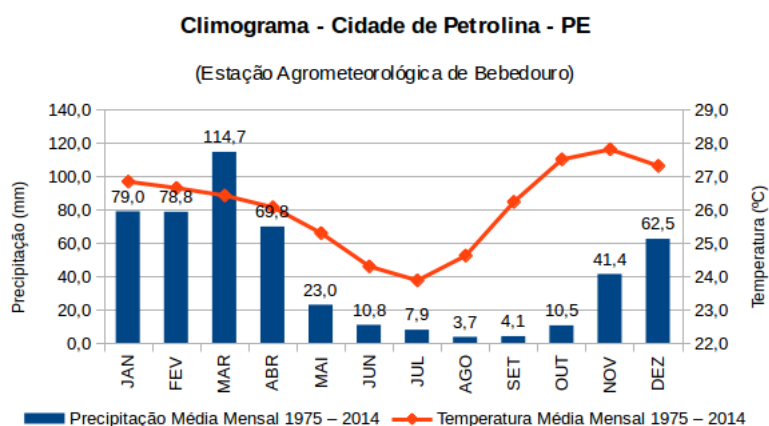


Figura 19 – Climograma da cidade de Petrolina-PE. Fonte: elaborado pelo autor.

500 mm e períodos de grande insolação, superiores a  $7 \text{ h.dia}^{-1}$ , que corresponde a uma média aproximada de  $2520 \text{ h.ano}^{-1}$ . Com umidade relativa do ar em torno de 60%.

### 3.1.2 Solo

A Figura 21 mostra o mapa de solos da área em estudo, mesmo sendo em uma escala pequena (1:5.000.000), as variações pedológicas são claramente perceptíveis. Nota-se em maior abundância os Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos (LV Ae) mais a oeste da região estudada, seguidos pelos Argiossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos (PVAe) localizados em maior quantidade a porção leste da área de estudo e em menor quantidade os Planossolos Háplicos Eutróficos (SXE).

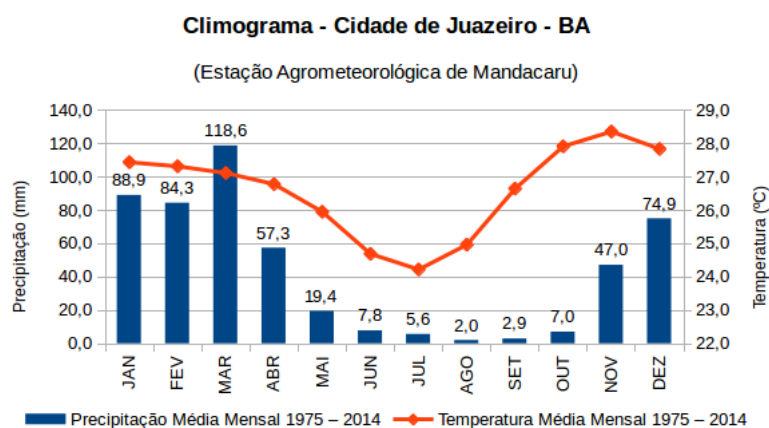


Figura 20 – Climograma da cidade de Juazeiro-BA. Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros climáticos médios das duas maiores cidades da área de estudo

Variáveis	2014	
	Petrolina	Juazeiro
Precipitação (mm)	503,08	514,77
Insoleção (h.dia <sup>-1</sup> )	7,46	7,86
Temperatura Média (°C)	26,09	26,62
Temperatura Mínima (°C)	20,90	20,55
Temperatura Máxima (°C)	32,22	32,26
Umidade Relativa (%)	65,23	62,33

Fonte: EMBRAPA (2015)

Segundo Cavalcanti (1994), a classe pedológica dos latossolos são extremamente evoluídos, e não propícias a processos erosivos ou movimentações de massas, tais pontos são explicadas, devido as excelentes características físicas do mesmo. Este tipo de solo ocorre geralmente em condições de relevo mais plano, sendo, portanto um solo adequado a habitações e maquinários agrícolas.

A segunda classe mais encontrada, os argissolos, apresentam alta fertilidade, porém, fortes limitações com relação a falta de água, sendo muito propício a erosões em decorrência do relevo. Fato esse que é minimizado na área estudada, pois é uma área de irrigação automatizada e bastante plana. Geralmente, os argissolos são mais utilizados em pastagens e culturas perenes, que já estão mais adaptadas a longos períodos de estiagem.

Os planossolos, a menor classe encontrada na região estudada, localizada a margem leste do Rio São Francisco, são solos mais voltados a produção agropecuária, entretanto analisando juntamente com outras variáveis, dentre elas o relevo, alguns trechos podem ser utilizados para agricultura de subsistência.

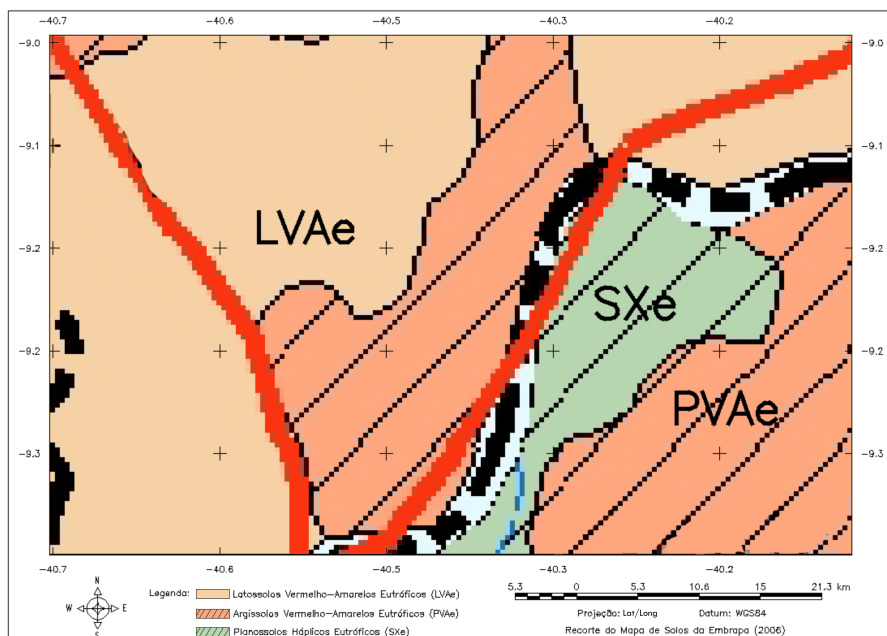


Figura 21 – Recorte do mapa de solos para a área de interesse nesta pesquisa. Fonte: EMBRAPA (2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção esta destinado a listar todos materiais e procedimentos necessários para o desenvolvimento dos objetivos desta pesquisa. Mesmo o trabalho se propondo a fazer uma implementação do algoritmo SEBAL em uma linguagem livre e aberta, presente no *software* SPRING, foi escolhida uma área de estudo como citada na seção anterior, para se aplicar a implementação e assim demonstrar que a mesma conseguiu alcançar a componente pretendida que é a evapotranspiração.

Será expresso aqui todos os passos existentes no algoritmo SEBAL e a forma que estas etapas foram implementadas na Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) do SPRING, assim como será detalhada todas as funções e estrutura da LEGAL.

A Figura 22 mostra o diagrama contendo os passos seguidos nesta pesquisa, abrangendo deste os estudos iniciais do algoritmo SEBAL, passando pela sua implementação e o teste realizado em uma área de estudo.

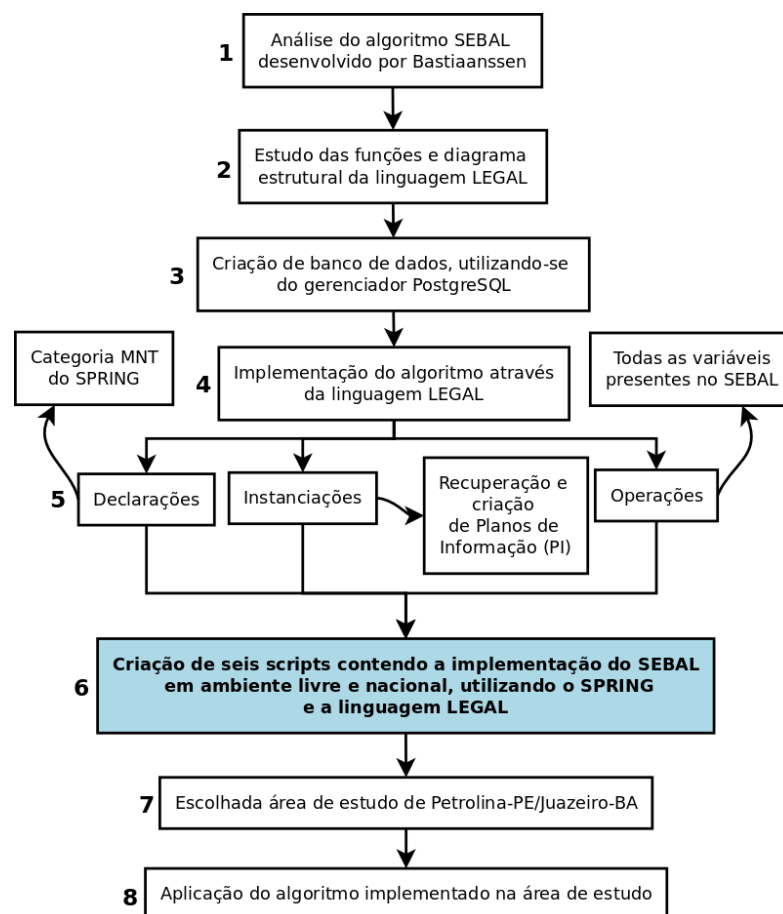


Figura 22 – Diagrama dos passos para a implementação do SEBAL em ambiente livre.  
Fonte: elaborado pelo autor.

O digrama acima mostra de forma crescente o desenvolvimento e ápice desta pesquisa, começando com a análise do algoritmo SEBAL, através de Bastiaanssen et al. (1998a), Bastiaanssen et al. (1998b); passando pelo estudo do diagrama estrutural da linguagem LEGAL; a escolha pela criação de um banco em PostgreSQL, por ser mais robusto e conseguir trabalhar com grandes volumes de dados; depois desses três passos que se começou a implementação do algoritmo de forma efetiva.

A etapa 4 foi a que demandou mais tempo dentro dessa pesquisa, tendo em vista que na literatura nacional e internacional ainda não se tem trabalhos que utilizem o SEBAL implementado de forma livre e utilizando-se de software não proprietário. Na etapa 6 é o ápice da pesquisa, onde os scripts estão implementados e prontos para serem aplicados em estudos, é a etapa que encerra os objetivos dessa pesquisa, onde se busca implementar o algoritmo e deixar o processo menos oneroso para que assim mais pessoas venham a utilizar o algoritmo.

## 4.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

Um dos preceitos do SEBAL é a sua utilização em um relevo plano, diante do exposto, nesta pesquisa utilizou-se de um modelo numérico de terreno (MNT) para dar entrada em um dos dados que o algoritmo necessitada, que é a altitude em que se encontra a estação meteorológica. Com o intuito de se melhorar a acuraria nos resultados, foi modificado esta entrada de dado no algoritmo implementado, no lugar de se dar entrada somente em um valor pontual, foi colocado a média de altitudes da área obtida através do MNT.

O imagem utilizada nesta pesquisa foi a SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtidas através do endereço eletrônico <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Segundo Zyl (2001), o SRTM é um projeto realizado em conjunto pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), a *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) e a *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI), tendo como objetivo a produção de dados digitais de topografia de 80% da superfície terrestre, entre entre as longitudes de 60° N e 57° S.

Os dados SRTM originais foram coletados a cada 1 arco de segundo (aproximadamente 30 m), utilizando-se para isso de técnica de interferometria por radar (RABUS et al., 2003), porém sua distribuição a nível mundial somente foi liberada pelos detentores do levantamento, com perda da resolução espacial para 90 m.

A Figura 23, equivale respectivamente, ao mapa hipsométrico da área de estudo, o histograma da imagem e perfis de três seções transversais ao longo da área de estudo, comprovando assim a predominância de áreas plantas em toda a região. Analisando-se a Figura 23a, é notório que as áreas com maior valor hipsométrico se encontram a oeste da



região em estudo, alcançando valores de 647 m; sendo as área com menor hipsometria no entorno do Rio São Francisco.

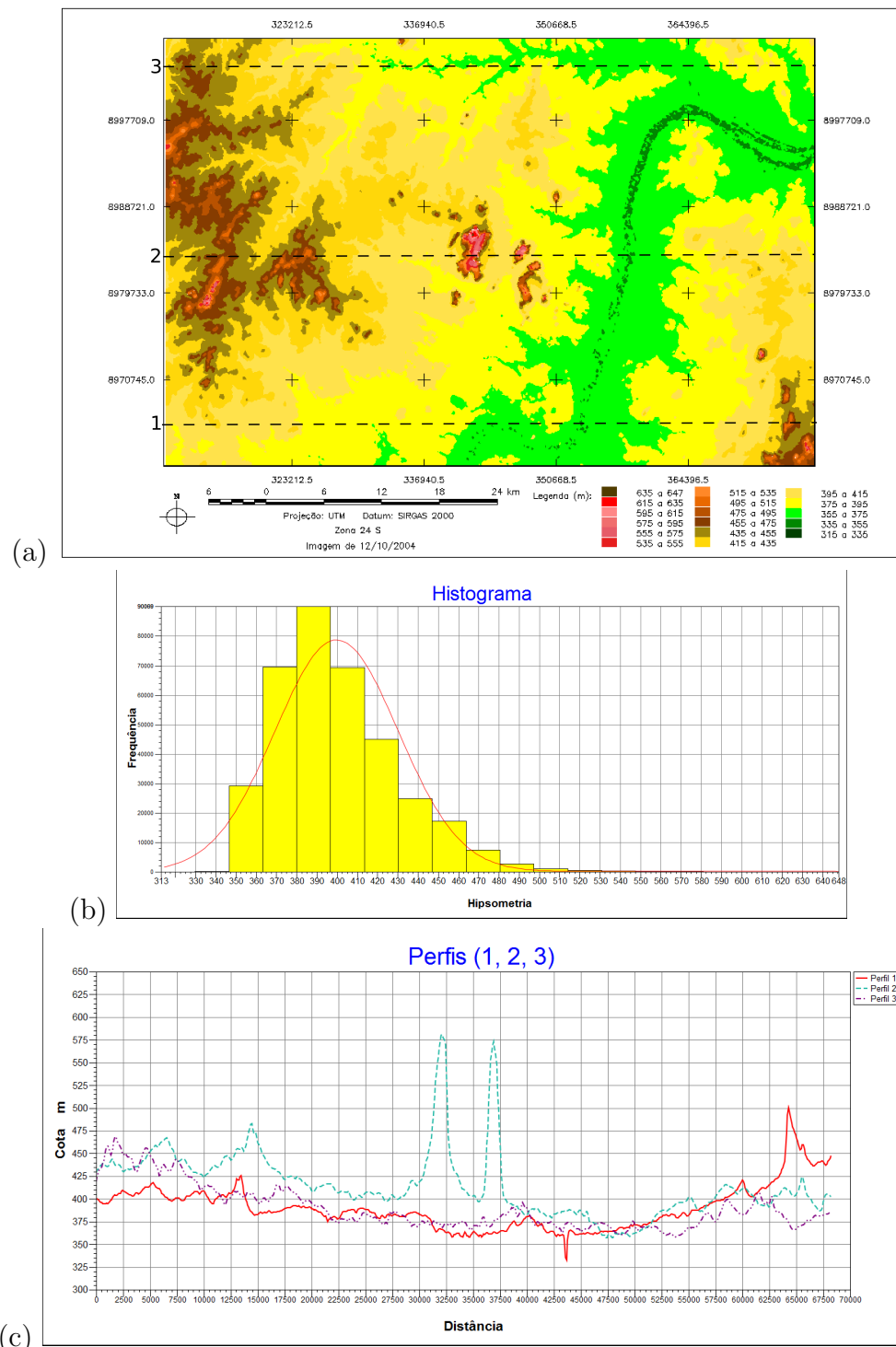


Figura 23 – (a) Mapa hipsométrico da área de estudo, (b) Histograma da imagem, (c) Perfis topográficos. Fonte: elaborado pelo autor.

## 4.2 Mapa de Uso e Cobertura do Solo

Visando o entendimento da área estudada durante a aplicação dos *scripts* desenvolvidos nesta pesquisa e apresentada na seção de resultados, foi gerado um mapa de uso e cobertura do solo utilizando-se de uma das imagens adquiridas do Landsat 5. O mapa foi obtido com o sua de classificação supervisionada, através da análise de pixels (Figura 24). Com a finalidade de se comprovar a acurácia na classificação realizada, foi analisada a matriz de confusão dos pixels amostrados e extraído um índice que segundo Ma e Redmond (1995) verifica a precisão com que a classificação é executada, este índice denominado Tau possui uma escala variando entre 0 indicando uma baixa precisão da classificação e 1 indicando uma excelente acurácia de classificação, o mapa desta pesquisa alcançou valor de 0,9991, logo é considerado de alta precisão.

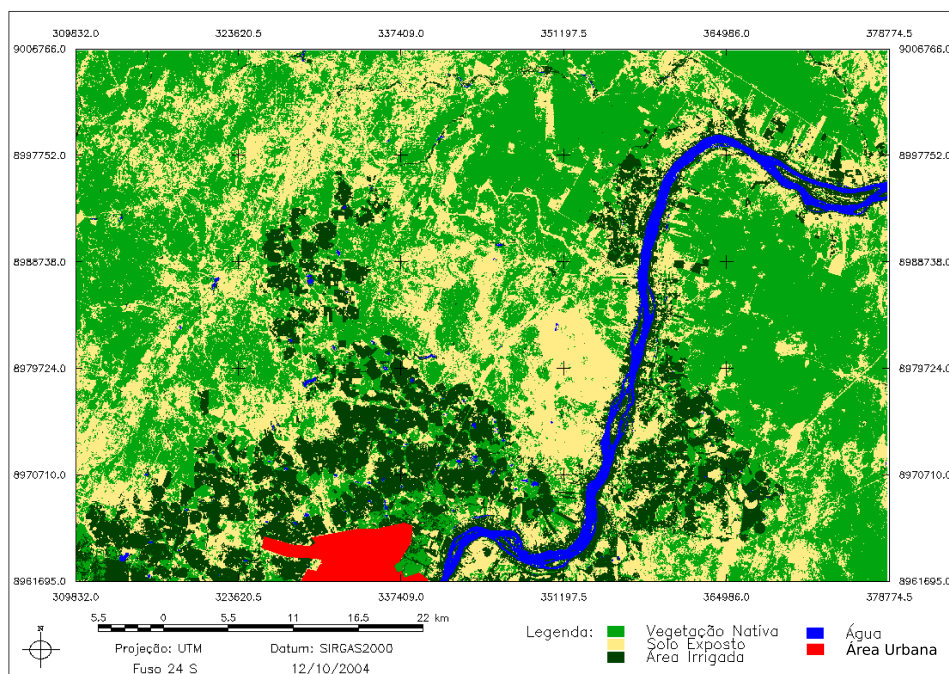


Figura 24 – Mapa de uso e cobertura do solo da região do complexo irrigado Petrolina-PE/Juazeiro-BA. Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser vista na Figura 24, as áreas em vermelho representam a presença de zonas urbanas, neste mapa tal área corresponde a cidade de Petrolina-PE; a cor azul está representando corpos de água; a bege áreas de solo exposto; verde claro vegetação nativa, percebe-se que esta é a faixa com maior ocorrência em toda a região, vale ressaltar que a vegetação nativa da área em estudo corresponde a vegetação de baixo porte e bastante esparsa, o que é comum em regiões semiáridas; por último a cor verde escuro representa as áreas com presença de culturas irrigadas.

### 4.3 Georreferenciamento da imagem orbital

As imagens utilizadas nesta pesquisa como teste para a implementação do algoritmo no *software* SPRING, são referentes aos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, obtidas pelo sensor TM do satélite Landsat 5. Optou-se por usar imagem desse satélite, por já ter uma literatura que apontasse os caminhos de como converter seus valores brutos (números digitais - ND) em informações de reflectância, e demais variáveis calculadas pelo SEBAL. As datas foram escolhidas, pois, não possuem nenhuma nebulosidade sobre a área de estudo, minimizando assim erros dos valores estimados. Apesar do Landsat 8 ter imagens de melhor qualidade, tendo em resolução espectral como radiométrica, as mesmas ainda necessitam de estudos aprofundados para gerar coeficientes de calibração que permitam alcançar dados corretos em sua utilização.

Foram adquiridas junto ao Departamento de Geração de Imagens (DGI), vinculado ao INPE, através do endereço eletrônico <<http://www.dgi.inpe.br/>>, estas imagens não são georreferenciadas, possuindo assim um deslocamento posicional. Com o intuito de se corrigir este deslocamento, é realizado o georreferenciamento da imagem, ou seja, o refinamento posicional, para que as imagens possuam um sistema de referência que coincida com sua posição na superfície terrestre.

Dentre os diversos procedimentos existentes, nesta pesquisa, foi utilizado o georreferenciamento imagem-a-imagem, optou-se por tal procedimento, tendo em vista que é o menos oneroso e o mais rápido, tendo em vista o tempo que leva para um trabalho de campo. Para se realizar este procedimento é necessário que se tenha imagem da área estudada, que possuam um afirmar que seu posicionamento é fidedigno. As imagens para esta finalidade mais utilizadas são as Geocover, que são mosaicos feitos pela NASA, a partir de imagens do Landsat 7, obtidos pelo sensor ETM+ e que tiveram suas resoluções espaciais reamostradas, alcançando um valor de 14,25 m. As imagens Geocover foram baixadas através do endereço eletrônico <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>.

O georreferenciamento imagem-a-imagem, é baseado na identificação de feições (pontos de controle) que correspondam a um mesmo objeto tanto na imagem base (Geocover), quanto na imagem a ser corrigida geometricamente. Na imagem utilizada neste estudo, foram capturados 20 pontos de controle.

O processo de correção geométrica foi realizado através do *software* SPRING, em sua versão 5.2.7, sendo executado em ambiente operacional UBUNTU, em sua versão 14.04. O passo inicial para se georreferenciar uma imagem no SPRING é a conversão do formato original da imagem \*.tiff para o formato nativo do SPRING \*.spg, este processo é realizado através do módulo IMPIMA, onde as imagens são exportadas e depois salvas com a nova extensão.

No SPRING foi criado um banco de dados local, utilizando-se o gerenciador

PostgreSQL, versão 9.4.1, posteriormente foi importada a imagem base em formato \*tiff e em seguida através da opção de registro, foram importadas em uma janela auxiliar as imagens com extensão \*.spg. Com as imagens já em seus ambientes, foram sendo determinados os pontos de controle, primeiro é localizado o ponto na imagem base, em seguida na imagem a ser georreferenciada.

Foram marcados 25 pontos de controle em casa imagem, sendo posteriormente descartados 5 pontos da imagem do dia 12/10/2004, por verificar que estavam com discrepância no deslocamento, analisando o erro médio quadrático (RMS) dos pontos, foi encontrado o valor de 0,158 e 0,132, para os dias 12/10 e 13/11/2004, respectivamente; sabendo-se que tal erro deve ter valores menores que 0,5, o resultado alcançado esta dentro do esperado. As imagens foram georreferenciadas tomando para base o *datum* oficial do BRASIL, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e a projeção UTM, referente ao fuso 24 S.

## 4.4 Descrição da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL)

Este tópico demonstra os procedimentos necessários ao entendimento dos métodos aplicados para a implementação do SEBAL através da LEGAL, todos as operações em LEGAL são baseadas nos dados presentes em um projeto de um banco de dados ativo do SPRING, e por isso seguem as mesmas categorias: Temático, MNT, Imagem, Cadastral, Objeto e Rede.

Um *script* em LEGAL consiste de uma sequência de operações que são descritas por diversas sentenças organizadas, seguindo regras semânticas; envolvendo declarações, instanciações e operações que se utilizam de dados espaciais, que por sua vez seguem as categorias do SPRING.

### 4.4.1 Estrutura de um *script* em LEGAL

Um *script* em LEGAL é determinado por uma lista de sentenças que descrevem os procedimentos que devem ser seguidos, ou seja, é um agregado de ações que irão agir sobre os dados espaciais, seguindo um sentido lógico. A LEGAL é estruturada seguindo quatro grupos: Declarações de variáveis; Instanciações de variáveis; Operações da álgebra de mapas e os Comandos de controle.

Neste contexto, a declaração será a parte do *script* que irá definir e associar as variáveis as suas categorias e modelos. Na sua criação é necessário o apontamento de um modelo, um nome e uma categoria, que é um diretório dentro da árvore dos planos de informação (PI's), onde a variável será armazenada.

Logo depois vem a instanciação, neste momento será recuperada as informações já existentes no banco de dados do SPRING ou serão criadas novas informações, representando assim um novo plano de informação.

As operações, correspondem as expressões algébricas, que são compostas por uma ou mais operações, aplicadas nas variáveis declaradas. Permitem que operações de grande complexidades possam ser executadas partindo de outras menos complexas.

Permeando todos os grupos, os comandos de controle, são não operações algébricas por si só, porém contribuem no fluxo do processo, modelando situações que envolvem a necessidade de aplicação condicional ou repetições de uma mesma operação.

#### 4.4.2 Diagramas sintáticos

As estruturas de sentenças nos scripts em LEGAL, podem envolver os mais diversos tipos de símbolos; operadores; palavras reservadas do sistema, aparecem em azul dentro da estrutura; nomes de variáveis, conforme tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo de caracteres da linguagem LEGAL

<b>Operadores</b>	$+, *, \div$
<b>Sinais</b>	{, ;, (, ]
<b>Palavras reservadas</b>	Novo, MNT, ResX, Nome
<b>Nomes de variáveis</b>	ndvi, savi, Rn, ET

Fonte: Camara et al. (1996)

Os diagramas sintéticos, indicam através de setas os caminhos existentes para compor sentenças válidas em LEGAL, nos diagramas as palavras em negrito com inicial maiúscula, indicam palavras reservadas pelo sistema; as palavras em minúsculo indicam nomes de variáveis; as palavras entre aspas, nomes de planos do banco de dados do SPRING; as palavras em em itálico, são itens de sintaxe da linguagem e as palavras precedidas de // são comentários.

A Figura 25, mostra o diagrama sintático de um *script* escrito em LEGAL, mostrando que o início da escrita é indicado por uma chave ('{'), logo em seguida pode ser composto por uma ou mais sentenças, que devem conter declarações, instanciações, operações e caso necessário os comandos de controle, ao concluir o *script* se encerra com o fechamento da chave ('}'), é importante ressaltar que cada declaração, instanciação, operação ao comando, sempre se encerra com ponto e vírgula (;').

#### 4.4.3 Declarações

É a primeira etapa na construção do algoritmo em LEGAL, é nela que se estabelece todos os modelos e categorias que serão utilizados para dar entrada e saída de variáveis e

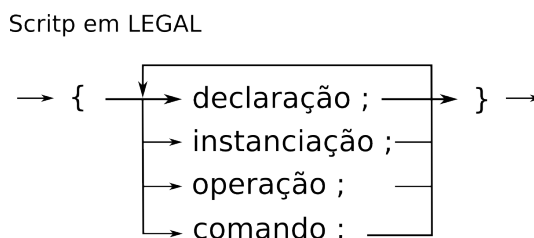


Figura 25 – Diagrama sintático de um *script* em LEGAL. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

suas associações aos planos de informação. Uma variável pode ser declarada através de cinco modelos de dados: Tematico, MNT, Cadastral, Objeto e Rede.

#### 4.4.3.1 Declaração de variáveis de campos, cadastrais e objetos

O procedimento para a declaração de uma variável envolve a associação de um nome, um modelo e uma categoria de dados e segue o diagrama sintático apresentado na Figura 26.

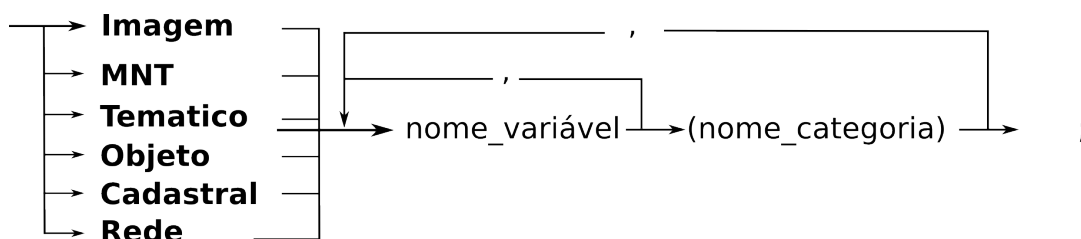


Figura 26 – Diagrama sintático de uma declaração em LEGAL. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

O diagrama tem início na identificação do modelo de dados que vai ser associado a variável trabalhada, posteriormente a associação a um nome que será o identificar da variável dentro do banco de dados do SPRING e por último o nome da categoria, o local que a imagens ficará armazenada dentro da árvores de PI's do SPRING. Para facilitar a compreensão e entendimento da estrutura da declaração dentro do ambiente em LEGAL, segue abaixo um exemplo:

---

```

1 {
2 MNT banda1, banda2, banda3 ("Bandas");
3 Tematico ndvi ("NDVI"), savi ("SAVI");
4 Imagem landsat ("IM");
5 Objeto obj ("Perimetros");
6 Cadastral cad ("Divisao_areas");
7 }
  
```

---

Analisando o código assim, fica mais nítida a percepção do digrama sintático apresentado na Figura 26. Na linha 2 do código esta sendo declarado um modelo de dados MNT para três variáveis (banda1, banda2 e banda3), e estas serão armazenadas em uma

única categoria (Bandas); na linha 3 percebe-se uma outra estrutura, o modelo agora é um Tematico, e suas duas variáveis (ndvi, savi) estão sendo armazenadas em categorias distintas (NDVI, SAVI). As linhas 4, 5 e 6 trazem exemplos simples onde é declarado um modelo, uma variável e uma categoria.

#### 4.4.3.2 Declaração de variáveis de tabela

Quando se está trabalhando com tabelas dentro do ambiente LEGAL, estas se baseiam na utilização para mapeamento entre campos de diferentes modelos de dados, ficando restrito ao uso entre: Tematico – Tematico; MNT – Tematico e Tematico- MNT). Existe uma forma própria de se declarar este tipo de variável, onde se utiliza o termo Tabela, seguido pelo nome da variável e um dos termos de transformação existentes na linguagem (Reclassificacao, Fatiamento ou Ponderacao). Neste procedimento a tabela somente será declarada, os valores utilizados só serão colocados durante a instanciação Na Figura 27 está o diagrama sintático deste procedimento e logo abaixo exemplos no código.

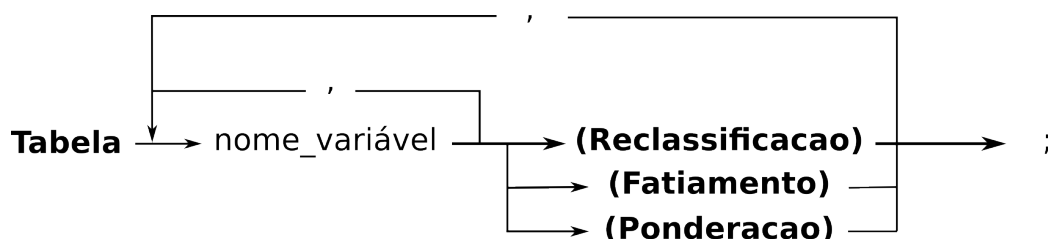


Figura 27 – Diagrama sintático de uma declaração de variável de tabela. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

---

```

1 {
2 Tabela altitudes (Fatiamento), pesos (Ponderacao);
3 Tabela reclass (Reclassificacao);
4 }

```

---

#### 4.4.4 Instanciação

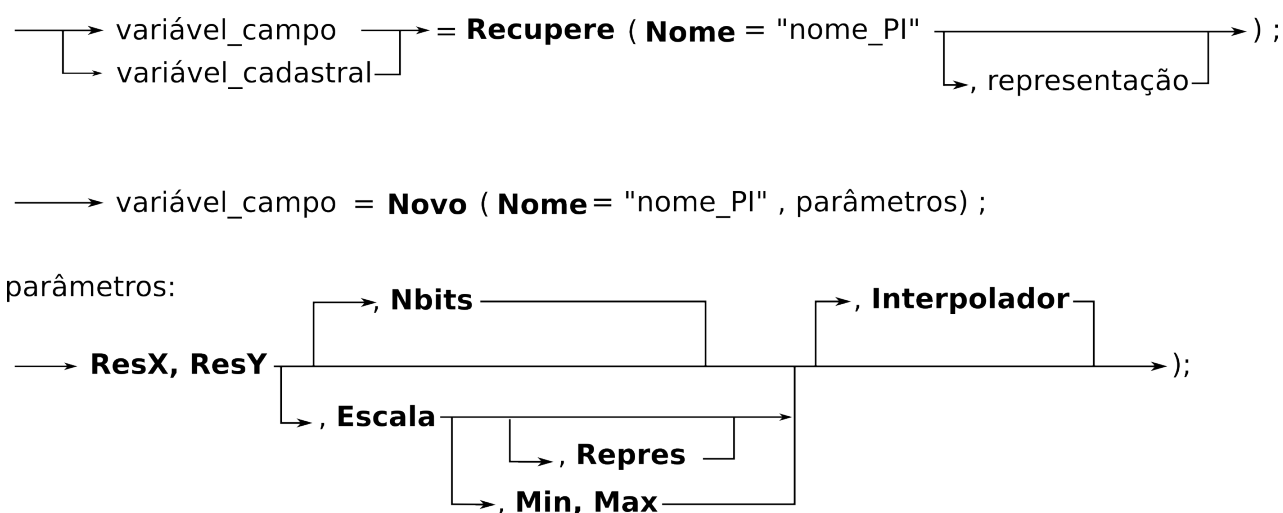
A instanciação é o processo de associação efetiva dos PI's do banco de dados ativo existentes ou que serão criados as suas respectivas variáveis dentro do ambiente da LEGAL. A instanciação ocorre com a atribuição de operadores, no caso da criação e associação de novos planos de informações a variáveis anteriormente declaradas, usa-se o operador Novo, caso esta associação ocorra com PI's já existentes, usa-se Recupere.

##### 4.4.4.1 Instanciação de variáveis de campos e cadastrais

A criação de variáveis através do operador Novo, pode ser utilizada para os modelos: MNT, Tematico e Imagem, e além do nome da variável a ser criada, exige a escrita de alguns outros parâmetros para que o *script* consiga interpretar tudo que se pretende. Os parâmetros existentes em LEGAL são:

- **ResX e ResY**: faz referência a resolução espacial a qual o plano deve ser considerado;
- **Escala**: é um parâmetro exigido nos modelos: Tematico e MNT, o qual irá determinar a escala que os planos serão trabalhados, se omitido o sistema irá considerar 1;
- **Min e Max**: utilizado na categoria numérica para determinar a faixa de valores da grade;
- **Repres**: utilizado para escolher que tipo de representação será admitida em uma variável, tem como escolha as opções: Matriz e Vetor, caso omitido o sistema considera o parâmetro como Matriz;
- **Nbits**: faz referência a resolução radiométrica da imagem, o valor padrão considerado para seja omitido, é de 8 bits;
- **Interpolador**: possui as escolhas por: Vizinho ou Bilinear, trata da interpolação na geração de grades ou imagens, o valor padrão é Bilinear.

Seu diagrama sintático pode ser visto na Figura 28, nota-se que tanto o operador Novo como o Recupere, são iniciados com o nome atribuído a variável dentro do ambiente em LEGAL, em seguida o nome do operador para depois ser colocado o nome do PI a ser recuperado ou do PI a ser criado. Para o operador Recupere o processo acaba neste ponto, enquanto para o operador Novo, é necessário se colocar alguns dos parâmetros supracitados.



**Repres = Vetor ou Matriz**  
**Interpolador = Vizinho ou Bilinear**

Figura 28 – Diagrama sintático de uma instanciação de variável de campos e cadastrais. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Como exemplo segue abaixo um modelo de código mostrando os processos de instanciações de variáveis de campo ou cadastrais.



---

```

1 {
2 bandal = Recuperere (Nome = "TM1");
3 srtm = Recuperere (Nome = "Hipsometria");
4
5 rn = Novo (Nome = "Saldo_Radicao", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000, Nbits = 8);
6 alt = Novo (Nome = "Altimetria", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 5000, Min = 0, Max = 100)
7   ;
8 alt2 = Novo (Nome = "Altimetria", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 5000, Min = 0, Max =
9   100, Interpolador = Vizinho);
10 }

```

---

#### 4.4.4.2 Instanciação de variáveis tabelas

Os operadores para a instanciação de variáveis tipo tabela, são: CategoriaIni e CategoriaFim, sendo três os tipos de transformação suportadas pela linguagem: Reclassificação, Ponderação e o Fatiamento, seu diagrama sintático pode ser visto na Figura 29.

variável\_tabela = **Novo** ( categorias\_tematica, mapeamento );

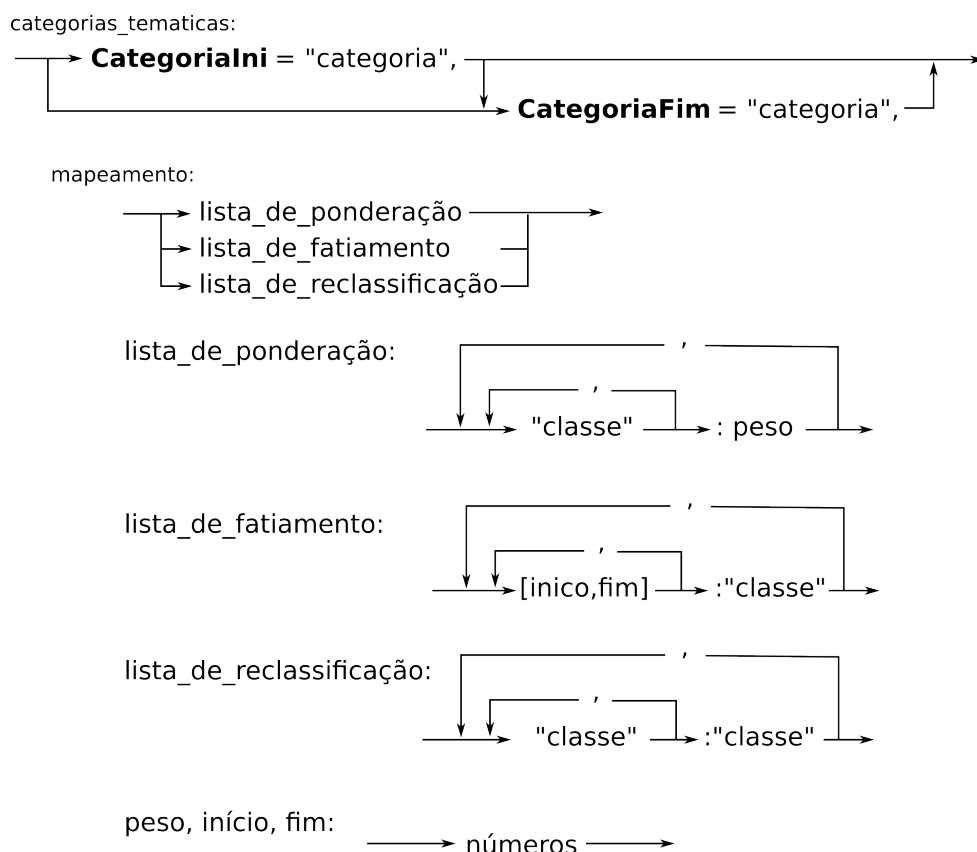


Figura 29 – Diagrama sintático de uma instanciação de variáveis tabelas. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Para o processo de reclassificação existe a necessidade de se possuir duas categorias temáticas, tendo em vista que tal procedimento descreve o mapeamento entre classes, com as substituições da classe existente por outra, como pode ser visto no exemplo abaixo.

---

```

1 {
2   class_super = Novo( CategoriaIni = Uso, CategoriaFim = Uso,
3     "agua" : "Lagos_e_Lagunas",
4     "vegetacao1" : "Vegetacao_rasteira"
5     "vegetacao2" : "Arbustos",
6     "vegetacao3" : "Florestas");
7 }

```

---

O procedimento de ponderação necessita apenas uma categoria temática, neste procedimento ocorre a substituição de de uma classe por um peso, e se utiliza do operador CategoriaIni, conforme o exemplo abaixo.

```

1 {
2   ponderacao = Novo( CategoriaIni = "Uso",
3     "Lagos_e_lagunas" : 0.2,
4     "Vegetacao_rasteira" : 0.4,
5     "Arbustos" : 0.1,
6     "Floresta" : 0.485 );
7 }

```

---

A última transformação suportada em LEGAL é fatiamento, que corresponde a divisão do mapeamento entre intervalos numéricos e classes temáticas de uma categoria também temática, utiliza-se do operador CategoriaFim, como pode ser visto no exemplo a seguir.

```

1 {
2   declividade = Novo( CategoriaFim = "valores",
3     [0 , 3] : "Plano",
4     [3 , 8] : "Suave-ondulado",
5     [8 , 20] : "Ondulado",
6     [20 , 45] : "Forte-ondulado",
7     [45 , 75] : "Montanhoso",
8     [75 , 90_] : "Escarpado" );
9 }

```

---

#### 4.4.4.3 Instanciação de variáveis reais

A variável do tipo real é a mais simples de ser instanciada, a simples certeza de que o nome da variável que se quer atribuir um valor real não foi utilizado anteriormente para definir outra variável, já é suficiente para se instanciá-la. Esta variável pode ser utilizada em expressões que utilizem diversos modelos de dados; MNT, Imagem, dentre outros. Seu diagrama sintático é bem simples, como mostrado na Figura 30. Assim como seus exemplos no código que se encontram abaixo.

—————> nome\_variável = valor\_numérico —————>

Figura 30 – Diagrama sintático de uma instanciação de variáveis reais. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

---

```

1 {
2 Lmin1 = -1.52;
3 Lmin2 = -2.84;
4
5 Lmax1 = 152.1;
6 Lmax2 = 296.61;
7
8 Esun1 = 1957;
9 Esun2 = 1826;
10 }
```

---

#### 4.4.5 Operações

A terceira e última etapa de um *script* em LEGAL são as operações, atentando que para cada tipo de modelo escolhido nas instanciações, existem um conjunto de operações válidas sobre eles. As operações são um conjunto de um ou mais operadores que irão atuar sobre as variáveis já declaradas e instanciadas.

Em LEGAL os operadores correspondem a expressões, de forma geral denominada de expressão de atribuição, onde a variável esta vinculada a uma expressão algébrica, que por sua vez atua diretamente em uma variável definida e instanciada nos passos supracitados, conforme Figura 31.

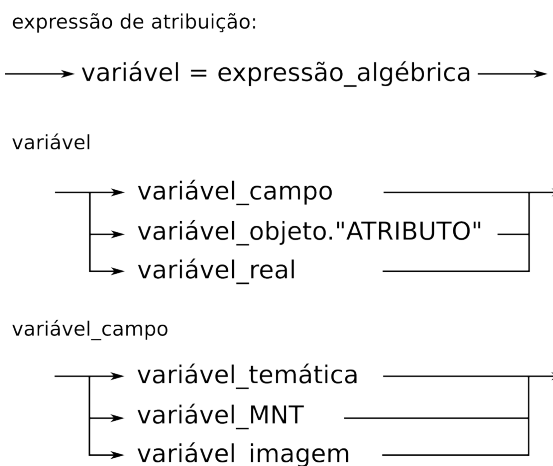


Figura 31 – Diagrama sintático de uma operação. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Em função do modelo de dados declarado e instanciado, as expressões podem variar, sendo classificadas em: expressões reais, imagem, MNT, temáticas, booleanas, zonais e objeto. Utilizando uma sintaxe mais detalhada o diagrama sintático poderia ser expresso da seguinte forma (Figura 32):

Nesta pesquisa era necessário se trabalhar com expressões algébricas de forma geolocalizada, ou seja, o valor atribuído deveria fazer referência a uma posição de deslocamento de  $i$  linhas por  $j$  colunas, ou por deslocamento de coordenadas  $X$  e  $Y$ .

expressão atribuição (mais detalhada)

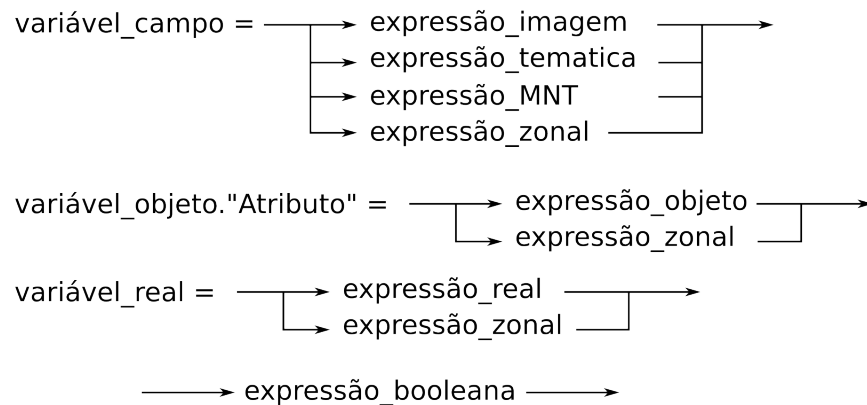


Figura 32 – Diagrama sintático de uma operação de forma detalhada. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Neste ponto, a LEGAL estava sem possuir tal sintaxe implementada, para a continuidade de forma satisfatória, foi de primordial importância a ajuda dos tecnologistas João Pedro Cerveira Cordeiro e Carlos Alberto Felgueiras, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que ao serem solicitados, implementaram tal expressão e enviaram um arquivo para que a pesquisa fosse continuada, posteriormente, a versão atual do SPRING 5.2.7, aberta ao público em geral e a utilizada nesta pesquisa já trás a sintaxe implementada. Exemplo da escrita em código de tal expressão pode ser analisada abaixo.

---

```

1 {
2 //Determinando e espacializando G do pixel quente por linha e coluna
3
4 G.quente = G.C == coluna quente && G.L == linha quente ? G : 0;
5
6 //Determinando e espacializando G do pixel quente por latitude e longitude
7
8 G.quente = G.Lat == coluna quente && G.Long == linha quente ? G : 0;
9
10 //Determinando e espacializando G do pixel quente por coordenada X e Y
11
12 G.quente = G.X == coluna quente && G.Y == linha quente ? G : 0;
13 }
  
```

---

#### 4.4.5.1 Expressões reais

São expressões que usam variáveis ou constantes, e como na aritmética usual formam expressões que trazem prioridade de operadores. Como o objetivo da ambiente em LEGAL é trabalhar com dados geoespaciais, as expressões reais são tratadas como auxiliares, seu diagrama esta expresso na Figura 33.

Analisando a Figura 33, notasse que a expressão real, é formada por diversas regras, como por exemplo, uma expressão real pode ser formada, por um números; variáveis reais; soma de expressões reais, utilizando-se para isto de operadores aritméticos: +, \*, /, -

dentre outros; além de funções matemáticas implementadas na linguagem, como pode ser visto na tabela 8.

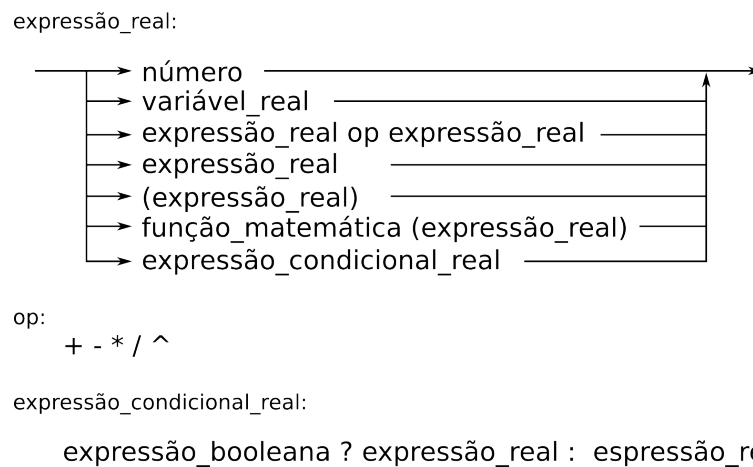


Figura 33 – Diagrama sintático de uma expressão real. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Tabela 8 – Funções matemáticas implementadas em LEGAL

<b>sin, cos, tan</b>	funções trigonométricas em radianos
<b>asin, acos, atan</b>	funções trigonométricas inversas
<b>log, log10</b>	funções logarítmicas na base e e na base 10
<b>exp</b>	exponencial na base e
<b>sqrt</b>	raiz quadrada
<b>int</b>	parte inteira de um número
<b>abs</b>	valor absoluto
<b>rand</b>	valor aleatório

Fonte: Camara et al. (1996)

#### 4.4.5.2 Expressões imagem

As expressões do tipo imagem são aplicadas em valores inteiros, comumente valores de 0 a 255, representando imagens com resolução radiométrica de 8 *bits*, analisando a Figura 34, percebe-se que expressões do tipo real, MNT ou temático, podem também ser entendidas como imagens, desde que o operador Imagem seja utilizado.

A questão colocada anteriormente pode ser entendida através da análise do banco de dados, ou seja, utilizando-se como exemplo de um modelo temático, suas classes em grande maioria são formadas por nomes, entretanto para o banco de dados cada nome criado, esta associado a um identificador (ID), logo se trabalho com o operador Imagem, utilizando um modelo temático, este irá considerar o ID e não o nome da classe.

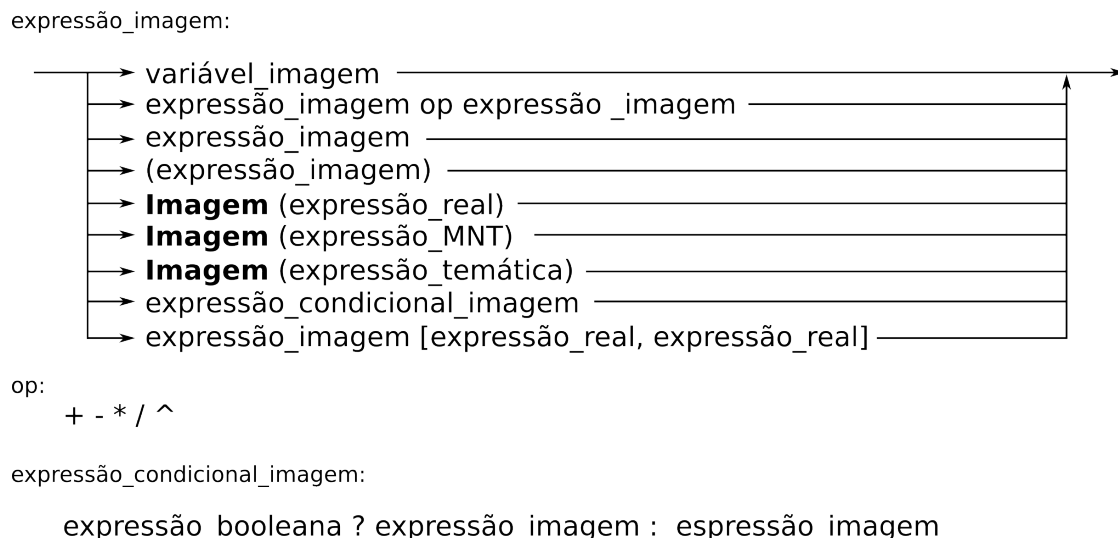


Figura 34 – Diagrama sintático de uma expressão imagem. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

#### 4.4.5.3 Expressões MNT

Diferente do tipo Imagem o tipo MNT assim como suas expressões, envolvem valores reais, nestas pesquisas a imagem utilizada importada para o SPRING já no modelo MNT, assim permitindo que os valores de radiâncias e reflectâncias, assim como os demais, assumissem valores corretos. A Figura 35 mostra as opções para variáveis que envolvam expressões MNT.

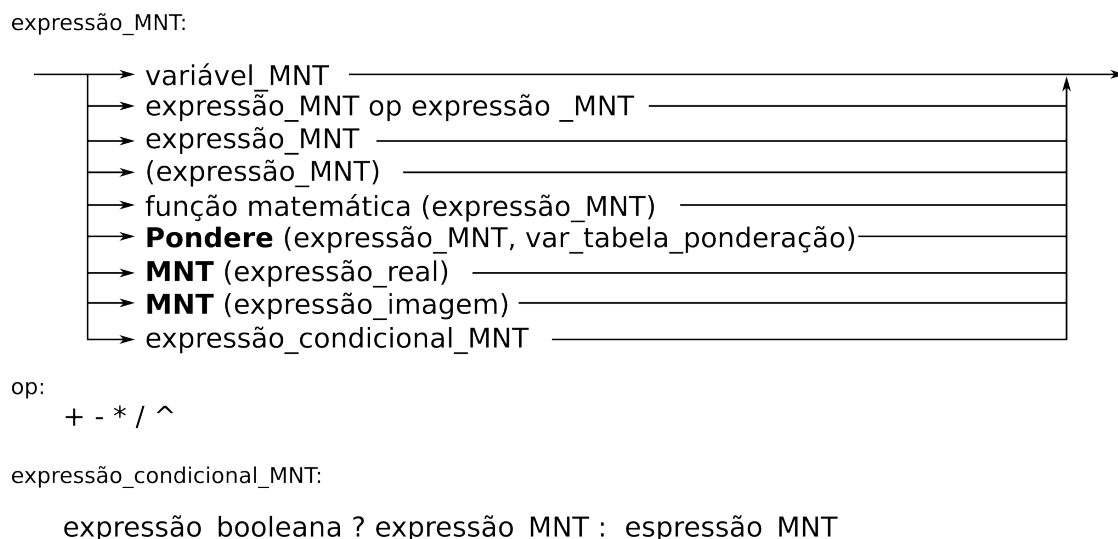


Figura 35 – Diagrama sintático de uma expressão MNT. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

#### 4.4.5.4 Expressões temáticas

Este tipo de expressão, diferente das anteriores não tem grande vinculo com operadores aritméticos, tendo em vista que suas representações indicam geoclasses e não

valores reais. Sendo assim as expressões realizadas envolvem valores de classes, presentes em tabelas ou atribuídos de forma condicional.

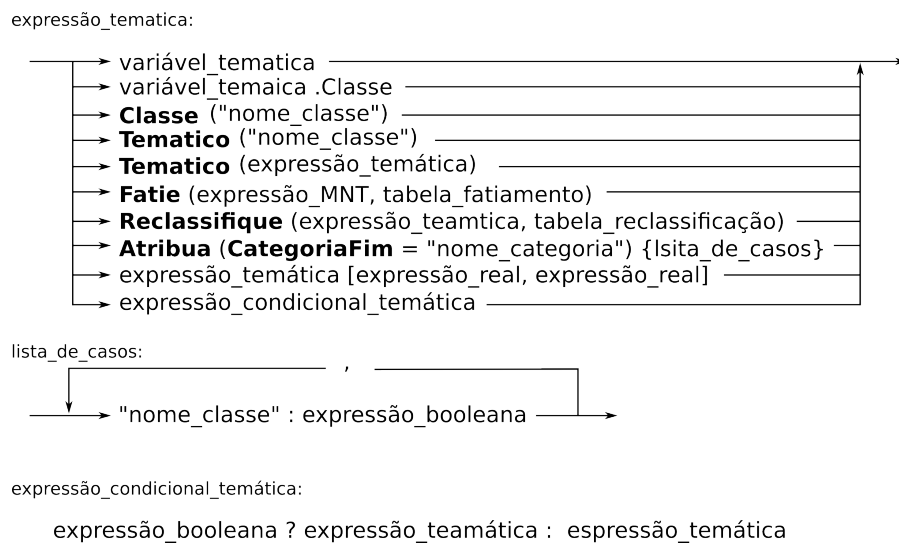


Figura 36 – Diagrama sintático de uma expressão temática. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

Como visto na Figura 36, qualquer palavra pode ser interpretada com um nome de geoclasse, desde que use os operadores reservados pelo sistema para tal procedimento: Tematico ou Classe, normalmente quando se trabalha com o modelo Tematico, esta se utilizando de variáveis qualitativas, onde seus valores são representados por nomes.

Um exemplo da aplicação de um operadores pertinentes a este tipo de expressão pode ser visto abaixo.

---

```

1 {
2 classes_hipsometria = Fatie ( hipsometria , tab_hipso );
3 usodosolo = Reclassifique ( mata , tab_recl );
4 aptidao = Atribua ( CategoriaFim = "aptidao" )
5     {
6         "Boa" : (solo == "LatosoloRoxo" && declividade == "0-3"),
7         "Inapto" : (solo == "AreiaQuat" && declividade == ">75")
8     };
9 }
```

---

#### 4.4.5.5 Expressões booleanas

As expressões booleanas descrevem conjunto de situações que atuam através da combinação dos outros tipos de expressões supracitadas, utilizando-se de operadores de comparação e de operadores lógicos (tabela 9).

O diagrama sintático expresso pela Figura 37, mostra que uma expressão de comparação esta diretamente auxiliada por uma expressão booleana, analisando os demais diagramas já mostrados, percebe-se que em quase toda a totalidade existe uma expressão condicional que pode ser utilizada em conjunto, esta expressão se utiliza de expressões

booleanas, permitindo um resultado de avaliação que pode assumir valores entre: Verdadeiro ou Falso.

Tabela 9 – Tabela de operadores de comparação e lógicos

Operadores de Comparação		Operadores Lógicos	
<	menor	&&	E-lógico (intercessão)
<=	menor ou igual		OU-lógico (união)
>	maior		OU-exclusivo (união disjunta)
>=	maior ou igual		
=	igual	! ou ~	NÃO-lógico (complemento)
!=	desigual		

Fonte: Camara et al. (1996).

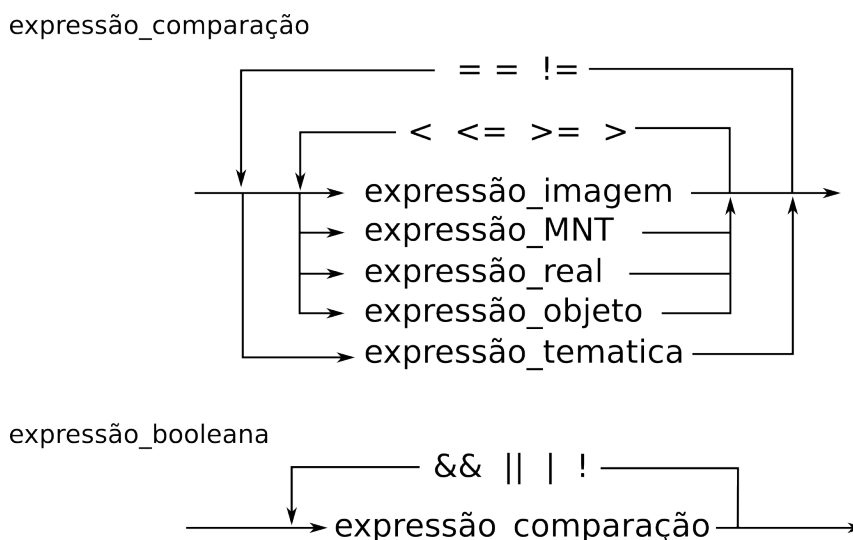


Figura 37 – Diagrama sintático de uma expressão booleana. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

#### 4.4.5.6 Expressões zonais

Como o próprio nome expressa, as expressões zonais, consistem na organização de um conjunto de valores oriundos de um certo PI, que se encontrem dentro de zonas definidas por outros PI's. Possui operadores de estatísticas simples, tais como: Maioria, Minoria, Media, dentre outros, como pode ser visto na Figura 38.

#### 4.4.5.7 Expressão objeto

As expressões objetos envolvem atributos, oriundos de modelos Objetos do SPRING, tal modelo representam tabelas importadas pelo usuários que possuem valores em suas linhas e colunas. Neste tipo de expressão os dados cadastral aos quais a tabela esta associado não tem importância, tendo em vista, que as operações são realizadas entre valores das colunas, com ao objetivo de gerar outros valores para outras colunas.



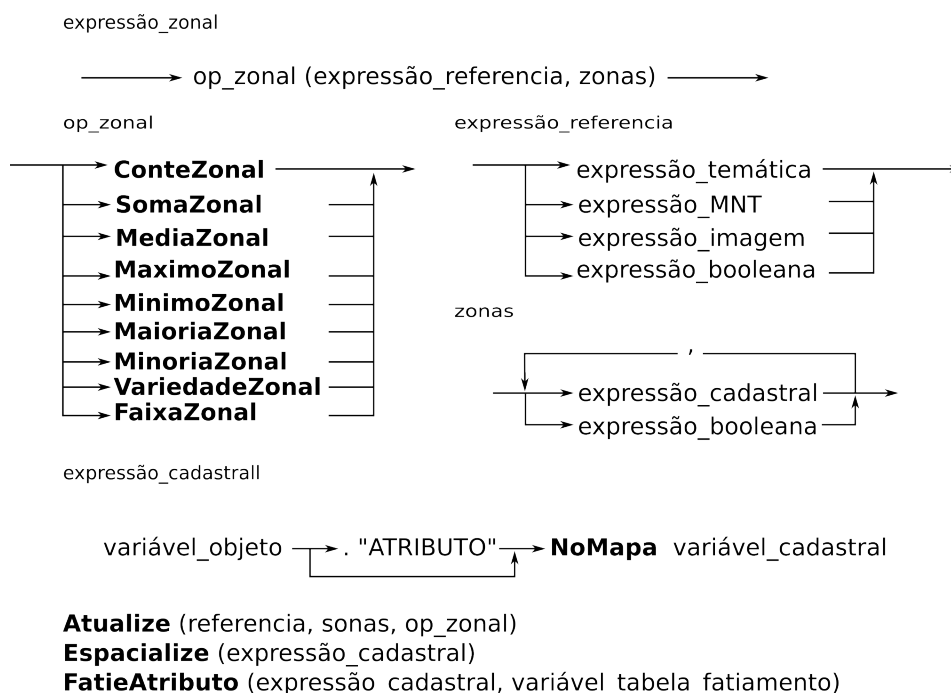


Figura 38 – Diagrama sintático de uma expressão zonal. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

A Figura 39, mostra o diagrama sintático deste tipo de expressão, onde percebe-se que não existem a possibilidade de se utilizar dados de outros modelos com operadores da expressão objeto em nenhuma das regras do diagrama.

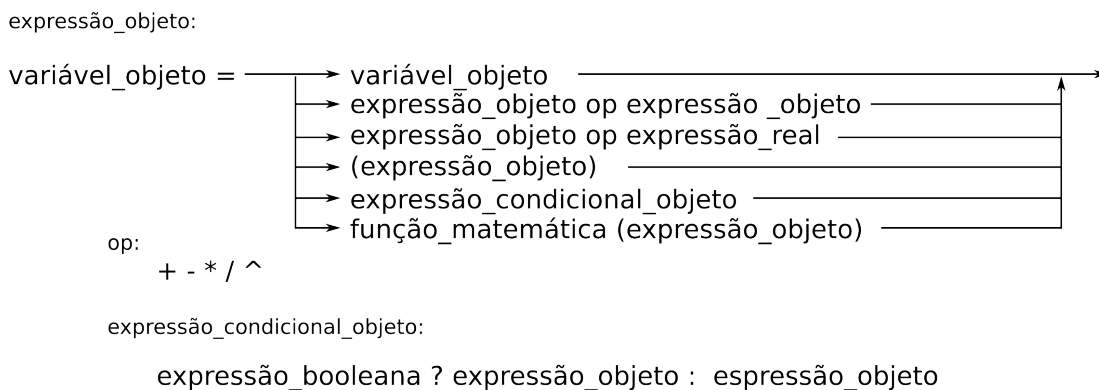


Figura 39 – Diagrama sintático de uma expressão objeto. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

```

1 {
2 Alagoas."Previsao" = Alagoas."Atual" * Alagoas."Taxa_anual";
3 Alagoas."Previsao" = Alagoas."Desempenho" > 50 ? Alagoas."Atual" * Alagoas."Taxa_anual" :
   Alagoas."Atual";
4 }

```

No código acima, notasse que a expressão objeto faz as análises de colunas de uma mesma tabela, no exemplo a tabela “Alagoas” esta sendo utilizada, e as colunas presentes na mesma, é que forma os atributos que serão utilizados na expressão.

A linha 3 do código mostra uma expressão condicional que vem sendo apresentada em outras expressões, e pode ser lida da seguinte forma: existe a coluna Previsao, vinculada a tabela Alagoas; se o valor da tabela Desempenho for maior que 50 então o valor que será atribuído na coluna Previsão será o valor da coluna Atual multiplicado pelo valor da coluna Taxa\_anual, em caso contrário, será atribuído o valor da coluna Atual, este tipo de expressão é muito útil quando se quer realizar filtragem em alguns tipos de variáveis.

#### 4.4.6 Comando de controle

Constituem uma classe de operadores que permitem o controle do andamento de execução de um *script* em LEGAL, pode ter vinculo com uma expressão booleana, ou participar como um controle de interações dentro de um grupo de operações algébricas, são baseados em sintaxes que envolvem condições tais como:

- **Se, Senão;**
- **Enquanto**

O comando Enquanto esta implementado em LEGAL e pode ser escrito como no exemplo abaixo

---

```

1 {
2   n = 0;
3   Enquanto ( n < 20 )
4     {
5     A + B;
6     B + C;
7     n = n + 1;
8     };
9 }
```

---

O Enquanto, corresponde a uma sequência de operações que devem ser executadas repetidas vezes, até que a condicional que é dada por uma expressão booleana resulte em uma condição verdadeira. Conforme Figura 40.

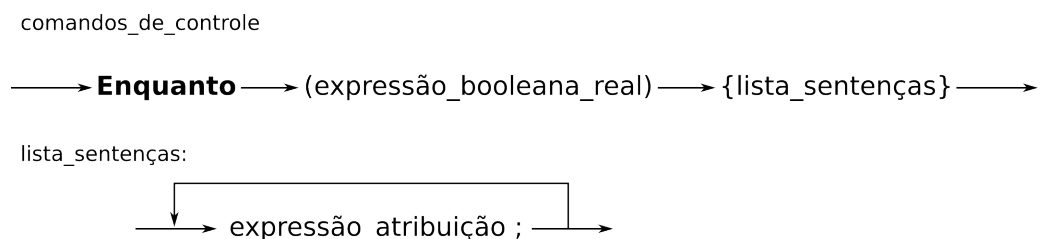


Figura 40 – Diagrama sintático do comando de controle Enquanto. Fonte: adaptado de Camara et al. (1996).

O comando Se, Senão; ainda não encontra-se implementado com esta sintaxe, porém pode ser utilizado como a expressão condicional já mencionada acima, e que vem sendo mostrado seu diagrama sintático para cada tipo de expressão.

## 4.5 Etapas para o cálculo do algoritmo SEBAL

Nesta pesquisa a linguagem escolhida para implementação do algoritmo SEBAL, foi a Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), presente no *software* SPRING. Optou-se por utilizar tal linguagem, tendo em vista se tratar de um produto nacional, presente em um *software* também nacional, que é altamente disseminado não só no Brasil, mas em vários países do mundo.

A Figura 41, mostra o diagrama metodológico do SEBAL até sua primeira etapa, que trata do cálculo do saldo de radiação à superfície, acrescentando-se algumas alterações em dados de entrada e saída feitos nessa pesquisa, que foram implementados juntos com todos os passos abaixo citados através da linguagem LEGAL. Ao todo com a primeira e segunda etapa do SEBAL, gerou-se seis scripts que são executados em lotes do SPRING, onde as variáveis de um são dependentes das encontradas nos demais.

### 4.5.1 Calibração radiométrica ( $L_\lambda$ )

Nesta primeira processo do SEBAL, ocorre a conversão dos números digitais (ND), para radiância espectral, que pode ser compreendida como a energia proveniente do Sol que é refletida por cada pixel em uma determinada unidade de área, de tempo e ângulo. A radiância espectral foi calculada conforme a equação 4.1 (MARKHAM; BARKER, 1987).

$$L_{\lambda(x,y)} = L_{min} + \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \cdot ND_{\lambda(x,y)} \quad (4.1)$$

Onde:  $L_{min}$  e  $L_{max}$  são as radiâncias espectrais mínimas e máximas, dadas em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ , como pode ser visto na tabela 10; (x,y) representa as bandas espectrais 1, 2, 3, ..., 7 da imagem e ND representa o número digital de cada pixel das imagens.

Tabela 10 – Valores das radiâncias mínimas e máximas e da irradiância solar espectral no tipo da atmosfera

Bandas Espectrais	Radiância Espectral $L_{min}$ e $L_{max}$						$ESUN_\lambda$ $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$
	01/03/1984, 04/05/2003		05/05/2003, até 01/04/2007		02/04/2007, até atualmente		
	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	$L_{min}$	$L_{max}$	
1	-1,52	152,10	-1,52	193,0	-1,52	193,0	1957
2	-2,84	296,81	-2,84	365,0	-2,84	365,0	1826
3	-1,17	204,30	-1,17	264,0	-1,17	264,0	1554
4	-1,51	206,20	-1,51	221,0	-1,51	221,0	1036
5	-0,37	27,19	-0,37	30,2	-0,37	30,2	215,0
6	1,2378	15,303	1,2378	15,303	1,2378	15,303	-
7	-0,15	14,38	-0,15	16,5	-0,15	16,5	80,67

Fonte: adaptado de Chander, Markham e Barsi (2007).

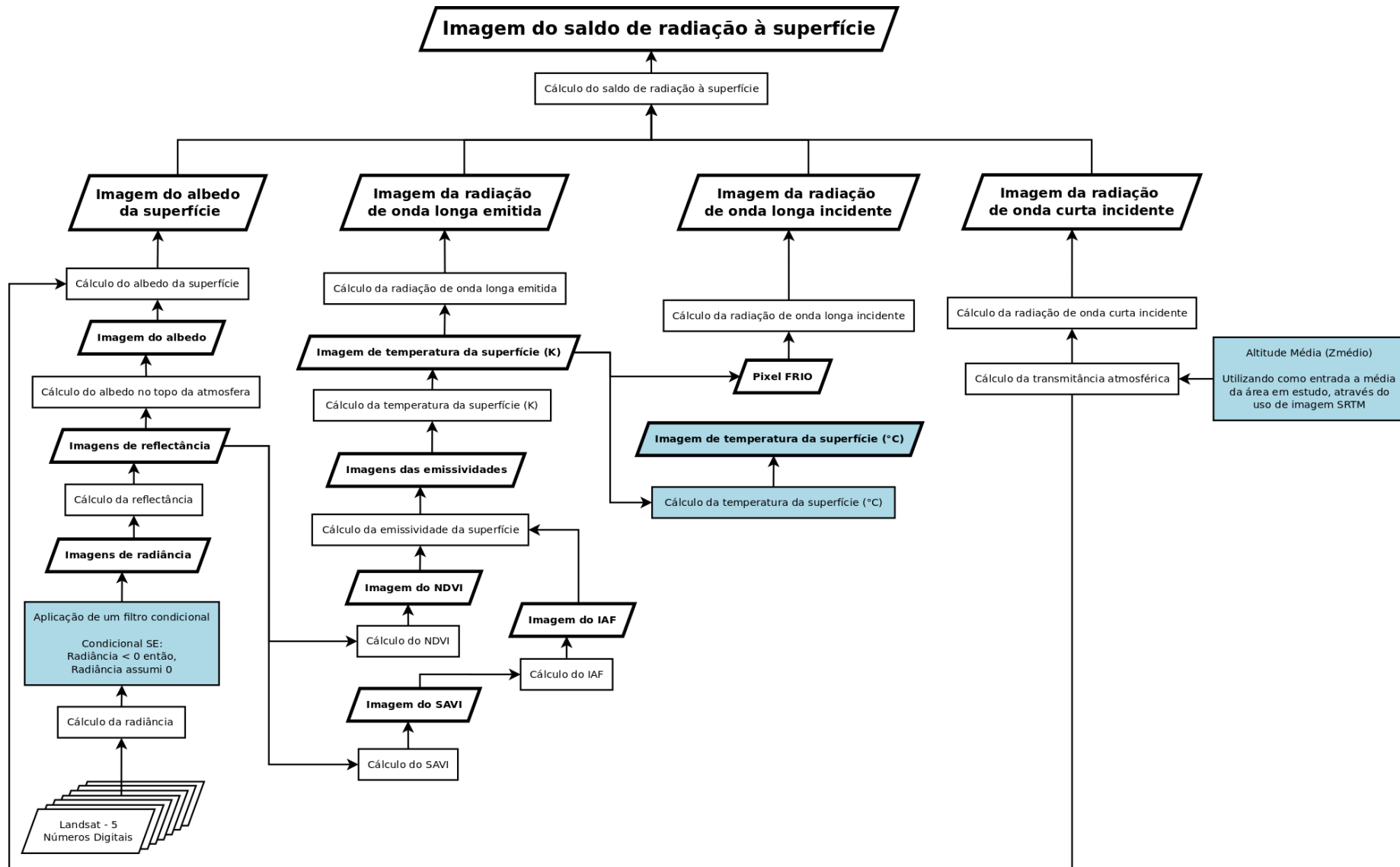


Figura 41 – Diagrama metodológico da primeira etapa do algoritmo SEBAL, com as adições feitas na implementação para linguagem LEGAL em azul. Fonte: elaborado pelo autor.

A calibração radiométrica da imagem é concluída após a conversão dos valores de radiância espectral encontrados em reflectância espectral. Segundo Allen et al. (2002), Silva, Lopes e Azevedo (2005), Bastiaanssen et al. (1998a), Bastiaanssen et al. (1998b), a reflectância espectral é a razão entre o fluxo de radiação solar emitido e o incidente, expresso conforme a equação 4.2.

$$\rho_{\lambda(x,y)} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda(x,y)}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot dr} \quad (4.2)$$

Onde:  $ESUN_{\lambda}$  é a irradiância solar espectral de cada banda medido no topo da atmosfera, tendo como unidade  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$  (tabela 10);  $\theta$  é o ângulo solar zenital;  $L_{\lambda(x,y)}$  é a radiância espectral e  $dr$  é o inverso do quadrado da distância Terra-Sol, em unidades astronômicas.

#### 4.5.2 Albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{TOA}$ ) e albedo da superfície ( $\alpha_{(x,y)}$ )

O albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{TOA}$ ) representa o valor do albedo sem correção, equação 4.3, expresso através do somatório das reflectâncias espectrais multiplicadas pelo respectivo peso, equação 4.4, de cada reflectância, enquanto que o albedo da superfície ( $\alpha_{(x,y)}$ ) é corrigido dos efeitos atmosféricos pela presença da transmitância como pode ser visto na equação 4.5.

$$\alpha_{TOA(x,y)} = \sum_{\lambda=1}^n (\omega_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda(x,y)}) \quad (4.3)$$

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (4.4)$$

$$\alpha_{(x,y)} = \frac{\alpha_{TOA(x,y)} - \alpha_{path_{rad}}}{\tau^2} \quad (4.5)$$

Onde:  $\alpha_{(x,y)}$  são as reflectâncias espectrais referentes as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do Landsat 5,  $\alpha_{path_{rad}}$  representa a radiação solar refletida pela atmosfera, segundo Bastiaanssen et al. (1998a), Bastiaanssen et al. (1998b), o valor para o SEBAL é de 0,03 e  $\tau^2$  representa a transmitância atmosférica, expressa pela equação 4.6, onde  $Z$  é a altitude da estação meteorológica utilizada.

$$\tau = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z \quad (4.6)$$

### 4.5.3 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O NDVI é obtido pela razão entre a subtração da reflectância das bandas IV (infravermelho próximo) e V (vermelho) e a soma das mesmas bandas (TUCKER, 1979).

$$NDVI_{(x,y)} = \frac{\rho^4_{(x,y)} - \rho^3_{(x,y)}}{\rho^4_{(x,y)} + \rho^3_{(x,y)}} \quad (4.7)$$

Em que  $\rho^3_{(x,y)}$  e  $\rho^4_{(x,y)}$  são as reflectividades das bandas 3 e 4, respectivamente, do Landsat 5, sensor TM. O NDVI é um índice que mede o verdor da vegetação e possui uma escala de valores que varia de -1 a 1, onde valores negativos representam corpos d'água e valores positivos, quanto mais próximos a 0 subentendesse que possui menor verdor e quanto mais próximo de 1 maior verdor vegetativo.

### 4.5.4 Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

O índice SAVI foi calculado utilizando-se a expressão proposta por Huete (1988), conforma equação 4.8.

$$SAVI_{(x,y)} = (1 + L) \cdot \frac{\rho^4_{(x,y)} - \rho^3_{(x,y)}}{L + \rho^4_{(x,y)} + \rho^3_{(x,y)}} \quad (4.8)$$

Onde L é uma constante de ajustamento, comumente onde na literatura comumente se utiliza o valor de 0,5 (NICACIO, 2008), (GOMES, 2009).

### 4.5.5 Índice de área foliar (IAF)

Após o cálculo do NDVI e do SAVI, foi possível calcular o índice de área foliar (IAF) estabelece a razão entre a área foliar total e a área ocupada pela cultura, é indicado pela equação 4.9, sendo uma determinação empírica estabelecida por Allen et al. (2002).

$$IAF_{(x,y)} = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI_{(x,y)}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (4.9)$$

### 4.5.6 Emissividades ( $\varepsilon NB_{(x,y)}$ e $\varepsilon_{(x,y)}$ )

A  $\varepsilon NB_{(x,y)}$  é estimado no domínio espectral da banda termal do sensor TM e a  $\varepsilon_{(x,y)}$  é obtida na faixa da banda larga. Segundo Allen et al. (2002), as emissividades, quando atendida a condição  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$ , podem ser obtidas pelas equações 4.11 e 4.12:

$$\varepsilon NB_{(x,y)} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF_{(x,y)} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{(x,y)} = 0,95 + 0,01 \cdot IAF_{(x,y)} \quad (4.11)$$

Segundo Allen et al. (2002), em caso de  $NDVI < 0$ , ou seja, se houver a existência de corpos d'água no local onde se pretende aplicar o algoritmo, logo será necessária uma nova condicional que determina que se  $NDVI < 0$  e  $\alpha < 0,47$  então  $\varepsilon NB_{(x,y)} = 0,99$  e  $\varepsilon_{(x,y)} = 0,985$ .

#### 4.5.7 Temperatura da superfície ( $T_S$ )

A temperatura da superfície é determinada levando em consideração a radiância espectral da banda 6 do Landsat 5 (termal) e a  $\varepsilon NB_{(x,y)}$ , sendo seus valores dados em graus Kelvin (K). Porém a faixa termal necessita de correção, tendo em vista que a radiância que o sensor recebe não é apenas proveniente da superfície terrestre, mas também emitida pela atmosfera. Tal correção pode ser realizada através da equação 4.12 (TASUMI, 2003).

$$R_C = \frac{L6_{corr} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon NB_{(x,y)}) \cdot R_{sky} \quad (4.12)$$

Onde  $R_C$  é a radiância da banda 6 corrigida, e difere de  $R_C \downarrow$  que é a irradiância solar global. Para que a correção da banda 6 ocorra é necessário a existência de perfis atmosféricos, tendo em vista que, os termos  $R_p$ ,  $R_{sky}$  e  $\tau_{NB}$  requerem o uso desses perfis e modelos de transferência de radiação, entretanto, segundo Allen et al. (2002) caso não haja disponibilidade de tais dados pode-se atribuir para  $R_p$ ,  $R_{sky}$  e  $\tau_{NB}$  os valores de 0, 0 e 1, respectivamente.

Diante dessa cenário a temperatura da superfície é calculada segundo a equação 4.13 (BASTIAANSEN, 1995):

$$T_{S(x,y)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon NB_{(x,y)} \cdot K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (4.13)$$

Sendo  $K_1$  e  $K_2$  constantes com valores de  $607,76 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$  e  $1260,56 \text{ K}$ , respectivamente (CHANDER; MARKHAM, 2003).

#### 4.5.8 Radiação de onda longa emitida ( $R_L \uparrow$ )

O cálculo da radiação de onda longa emitida é realizada utilizando-se da equação de Stefan-Boltzmann, sendo um expressa em função da emissividade e temperatura da superfície, conforme a equação 4.14:

$$R_L \uparrow_{(x,y)} = \varepsilon_{(x,y)} \cdot \sigma \cdot T_{S(x,y)}^4 \quad (4.14)$$

Onde:  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície, que possui unidade de medida adimensional [-];  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ );  $T_S$  é a temperatura da superfície, estimada pelo processo anterior em Kelvin (K).

#### 4.5.9 Radiação de onda longa incidente ( $R_L \downarrow$ )

Diferente da radiação de onda longa emitida, a radiação de onda longa incidente, refere-se a densidade de fluxo de radiação emitida pela atmosfera em direção a superfície (NICACIO, 2008).

Para execução do algoritmo SEBAL, é necessária a determinação de pixels âncoras, denominados de pixel frio e quente, e são utilizados para determinar a condição limite para o balanço de energia (NICACIO, 2008). Segundo Allen et al. (2002) e Tasumi (2003), o pixel frio deve ser selecionado em uma área úmida, com cultura bem irrigada e solo completamente coberto por vegetação.

A escolha do pixel frio desta pesquisa foi realizado segundo (NICACIO, 2008), que se utilizou das imagens de NDVI e IAF, tendo em vista que uma região bem irrigada apresenta altos valores de NDVI, e alto IAF.

O valor de  $R_L \downarrow$  é expresso segundo a equação 4.15:

$$R_L \downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_F^4 \quad (4.15)$$

Sendo  $R_L \downarrow$  é a radiação de onda longa incidente ( $W \cdot m^{-2}$ );  $\varepsilon_a$  é a emissividade aparente da atmosfera, expressa pela equação 4.16 (BASTIAANSSEN, 1995);  $\sigma$  que é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ) e  $T_F^4$  a temperatura do pixel frio em Kelvin (K).

$$\varepsilon_a = 1,08 \cdot (-\ln \tau)^{0,265} \quad (4.16)$$

#### 4.5.10 Radiação de onda curta incidente ( $R_C \downarrow$ )

Corresponde à radiação solar que incide de forma direta e indireta que atinge a superfície da Terra, é calculada segundo a equação 4.17 (BASTIAANSSEN, 1995):

$$R_C \downarrow = S_O \cdot \cos \theta \cdot d \cdot \tau \quad (4.17)$$

Em que  $S_O$  é a constante solar, equivalente a  $1367 W \cdot m^{-2}$  (IQBAL, 2012);  $\theta$  é o ângulo solar zenital;  $d$  o inverso do quadrado da distância Terra-Sol e  $\tau$  a transmitância atmosférica [-].



#### 4.5.11 Saldo de radiação ( $R_n$ )

Posterior ao cálculo das componentes: radiação incidente, emitida e refletida tanto com relação as ondas curtas como longas, estimasse o saldo de radiação à superfície, ou seja, a quantidade de energia radiante disponível na superfície para os processos de evaporação do solo e aquecimento do ar (NICACIO, 2008), é expresso através da equação 4.18.

$$R_{n(x,y)} = (1 - \alpha_{(x,y)}) \cdot R_C \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow_{(x,y)} - (1 - \varepsilon_{(x,y)}) \cdot R_L \downarrow \quad (4.18)$$

Onde:  $R_{n(x,y)}$  é o saldo de radiação à superfície, em  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\alpha_{(x,y)}$  é o albedo da superfície [-],  $R_C \downarrow$  é a radiação de onda curta incidente ( $W \cdot m^{-2}$ );  $R_L \downarrow$  é a radiação de onda longa incidente ( $W \cdot m^{-2}$ );  $R_L \uparrow$  é a radiação de onda longa emitida ( $W \cdot m^{-2}$ ) e  $\varepsilon_{(x,y)}$  é a emissividade de cada pixel da área de estudo [-].

#### 4.5.12 Fluxo de calor no solo (G)

O fluxo de calor no solo é calculado posteriormente ao cálculo da estimativa do saldo de radiação à superfície. O  $R_n$  é particionado em três variáveis, sendo elas: o fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e fluxo de calor no solo. Esta última partição é a primeira a ser estimada, e pode ser compreendida como a porção do  $R_n$  destinada ao aquecimento do solo (NICACIO, 2008).

Conforme expresso na equação 4.19, o fluxo de calor no solo é calculado em função do saldo de radiação ( $R_n$ ), do albedo ( $\alpha_{(x,y)}$ ), da temperatura da superfície ( $T_S$ ), sendo expressa em graus Celsius e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

$$G_{(x,y)} = \left[ \frac{T_{S(x,y)}}{\alpha_{(x,y)}} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_{(x,y)} + 0,0074 \cdot \alpha_{(x,y)}^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI_{(x,y)}^4) \right] \cdot R_{n(x,y)} \quad (4.19)$$

Segundo Silva e Bezerra (2006), o fluxo de calor em superfície de massas de água, é expresso por  $0,3 \cdot R_n$ .

#### 4.5.13 Fluxo de calor sensível (H)

A etapa mais trabalhosa e com maior necessidade de cuidados em sua execução é a do cálculo do fluxo de calor sensível, devido a necessidade de grande número de interação para se conseguir obter a variável. O diagrama mostrado na Figura 42 ilustra os procedimentos necessários para a obtenção do H.

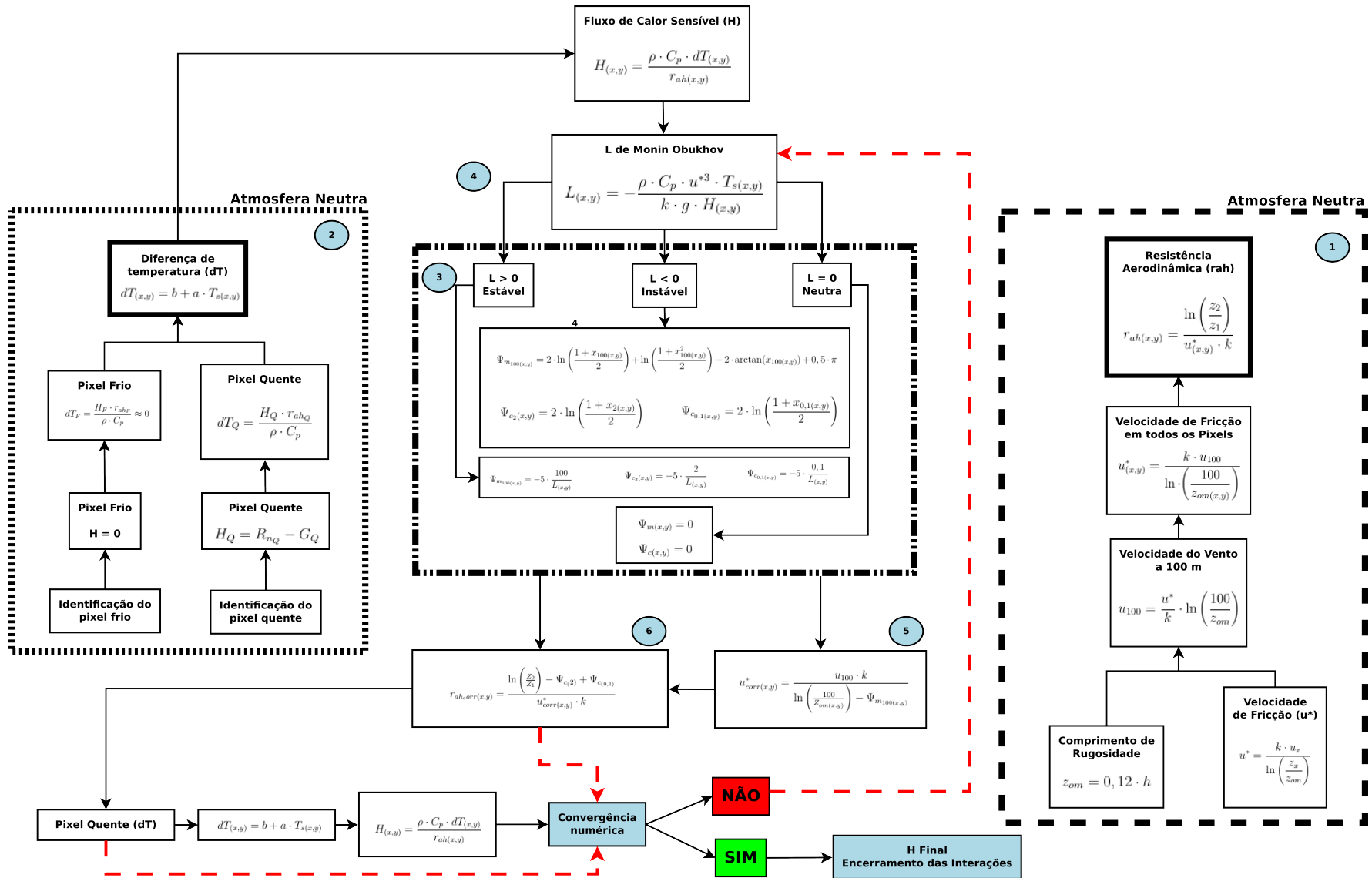


Figura 42 – Diagrama metodológico do fluxo de calor sensível e suas interações. Fonte: adaptado de Nicacio (2008).

Estes processos de transferências de energia para as camadas da atmosfera, existentes através de processos físicos de condução e convecção, que é o fluxo de calor sensível, é modelado através da equação 4.20 (BASTIAANSSEN, 1995); (TASUMI, 2003).

$$H_{(x,y)} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT_{(x,y)}}{r_{ah(x,y)}} \quad (4.20)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do ar ( $\rho = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $dT$  é a diferença de temperatura (K) entre duas alturas  $z_1$  e  $z_2$  acima do plano zero de deslocamento; e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica do ar para o transporte de calor ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

O fluxo de calor sensível necessita como expresso na equação 4.20 dos valores da resistência aerodinâmica e da diferença de temperatura em todos os pixels da imagem correspondente a área estudada, tais valores são dependentes da velocidade do vento e da temperatura da superfície, também de cada pixel, sendo que tais valores são desconhecidos, logo  $r_{ah}$  e  $dT$  também o são.

Partindo desse princípio o algoritmo SEBAL atribui algumas considerações para a estimativa de H, baseando-se na determinação dos pixels âncoras (frio e quente). A resistência aerodinâmica esta vinculada a dificuldade ofertada pelo ar ao transporte de calor (NICACIO, 2008), e pode ser expressa pela equação 4.21.

$$r_{ah(x,y)} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_{(x,y)}^* \cdot k} \quad (4.21)$$

Onde:  $z_1$  e  $z_2$  segundo Bastiaanssen (1995), são iguais a 0,1 e 2,0 m, respectivamente;  $u^*$  corresponde a velocidade de fricção, ou seja, a intensidade de movimentação turbulenta do ar em relação a rugosidade do terreno;  $k$  a constante de von Karman, equivalente a 0,41.

Para se conhecer a velocidade de fricção em todos os pixels da imagem, é necessário primeiro se ter uma base desta velocidade, tal procedimento é realizado calculando a  $u^*$  apenas no pixels correspondente a estação meteorológica existente na área de estudo, conforme equação 4.22, considerando para isso a condição de estabilidade atmosférica neutra.

$$u^* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{om}}\right)} \quad (4.22)$$

Sendo  $u_x$  a velocidade do vento captada em uma altura  $z_x$ , nesta pesquisa  $z_x$  foi igual a 9 m; e  $z_{om}$  é o coeficiente de rugosidade da superfície (m) conforme equação 4.23

proposta por (BRUTSAERT, 1982).

$$z_{om} = 0,12 \cdot h \quad (4.23)$$

O coeficiente de rugosidade é calculado apenas no pixels que contém a estação utilizada, em função da altura média da vegetação em seu entorno.

De posse dos valores da velocidade de fricção do pixel correspondente a estação, se faz necessário para continuar o processo saber o valor desta velocidade para todos os pixels da imagem. Diante do exposto segundo a equação 4.24, se faz necessário calcular a velocidade de fricção em um certa altura, denominada altura de mistura, ou seja, altura onde os efeitos da rugosidade de superfície são desprezíveis (NICACIO, 2008). Segundo Bastiaanssen (1995), esta altura corresponde a 100 m, seguindo o desenvolvedor do algoritmo a equação 4.24 segue calculando a altura de 100 m.

$$u_{100} = \frac{u^*}{k} \cdot \ln \left( \frac{100}{z_{om}} \right) \quad (4.24)$$

Sendo  $u^*$  a velocidade de fricção do pixel correspondente a estação meteorológico, calculado pela equação 4.22 e expresso em  $m \cdot s^{-1}$  e  $z_{om}$  o comprimento de rugosidade no pixel da estação, calculado pela equação 4.23. Vale ressaltar que existem pesquisas como as de Allen et al. (2002); Tasumi (2003) e Trezza (2002), que consideram a altura de mistura igual a 200 m, recomendasse uma análise da topografia da área estudada, em caso de muito escarpada, utilizar o maior valor.

Levando em conta que a velocidade do vento depois de escolhida a altura de mistura, não é mais afetada pela rugosidade da superfície, partindo desse princípio considera-se que a velocidade é constante para toda a imagem. Através da inversão da equação 4.24 é estimada a velocidade de fricção para todos os pixels, segundo a equação 4.25.

$$u_{(x,y)}^* = \frac{k \cdot u_{100}}{\ln \left( \frac{100}{z_{om(x,y)}} \right)} \quad (4.25)$$

Diferente do  $z_{om}$  calculado na equação 4.23, na equação 4.25, o valor do coeficiente de rugosidade é estimado em todos os pixels da imagem, para tal procedimento existem duas equações, uma proposta por Bastiaanssen (2000) que pode ser vista na equação 4.26 e que se utiliza dos valores encontrados do SAVI e outra proposta por Tasumi (2003), que pode ser vista na equação 4.27 e que se utiliza dos valores de IAF.

$$z_{om(x,y)} = \exp(-5,809 + 5,62 \cdot SAVI_{(x,y)}) \quad (4.26)$$

$$z_{om(x,y)} = 0,018 \cdot IAF_{(x,y)} \quad (4.27)$$

Segundo Allen et al. (2002) e Tasumi (2003), ainda existe um condição para regiões de corpos d'água e cidades, onde os valores de  $z_{om(x,y)}$  equivalem a 0,0005 e 0,2, respectivamente.

O primeiro cálculo da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ) estimada, vista na etapa 6 descrita no diagrama 42 é realizada como condição de atmosfera neutra. Os valores encontrados na equação 4.21 referentes a resistência aerodinâmica foram utilizados como informações de entrada para a diferença de temperatura, como visto na seção a seguir.

#### 4.5.13.1 Determinação da diferença de temperatura (dT)

A dT é o procedimento mais fundamental no processo de obtenção do fluxo de calor sensível (H). Segundo Bastiaanssen (1995), para se alcançar a determinação da diferença de temperatura, considera-se a existência de uma relação linear entre dT e  $T_s$  (equação 4.28).

$$dT_{(x,y)} = b + a \cdot T_{s(x,y)} \quad (4.28)$$

O primeiro passo para a determinação de dT, é a escolha dos pixels frio e quente na área estudada. Posterior a esta escolha dos pixels âncoras, é realizada algumas relações entre os fluxos existentes nas duas condições (Figura 43), onde assume-se que o valor do calor sensível no pixel frio é zero ( $H \approx 0$ ), enquanto no pixel quente assume-se que o fluxo de calor latente é aproximadamente zero. Quando esta considerações, calculou-se a diferença de temperatura nos pixels âncoras conforme as equações 4.29 e 4.31.

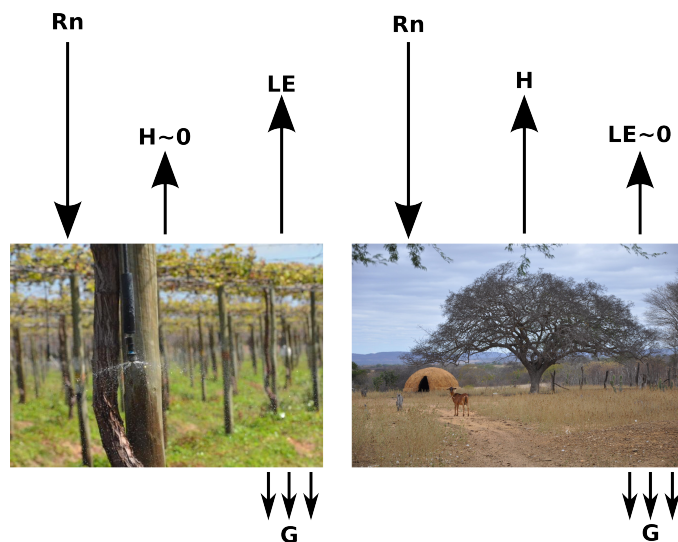


Figura 43 – Componentes do balanço de energia em região de fruticultura irrigada (imagem da esquerda) e solo exposto (imagem da direita). Fonte: adaptado de Nicacio (2008). Fonte das imagens: (EMBRAPA, 2015).

#### 4.5.13.2 Pixel quente

A diferença de temperatura no pixel quente  $dt_Q$  como já mencionado, pode ser expressa pela equação 4.29:

$$dT_Q = \frac{H_Q \cdot r_{ah_Q}}{\rho \cdot C_p} \quad (4.29)$$

Sendo  $r_{ah_Q}$  a resistência aerodinâmica no pixel quente, expressa em  $s \cdot m^{-1}$ ;  $\rho$  a densidade do ar ( $1,15 kg \cdot m^{-3}$ );  $H_Q$  é o fluxo de calor sensível no pixel quente ( $W \cdot m^{-2}$ );  $C_p$  o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ). Nos *script* gerados é de suma importância registrar a localização tanto do pixel quente quanto do frio para poder ser indicado de onde o valor deve ser buscado.

Simplificando a equação 4.29, tendo em vista que o fluxo de latente ( $\lambda ET_Q$ ), no pixel quente, é aproximadamente zero. Logo o fluxo de calor sensível no pixel quente ( $H_Q$ ) é calculado levando em consideração o fluxo de calor no solo (G) e o saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), segundo a equação 4.30.

$$H_Q = R_{n_Q} - G_Q \quad (4.30)$$

#### 4.5.13.3 Pixel frio

A determinação da dT no pixel frio é expressa conforme a equação 4.31, como no pixel frio o fluxo de calor sensível é aproximadamente zero, logo toda a equação é anulada e assume-se  $dT_F \approx 0$ .

$$dT_F = \frac{H_F \cdot r_{ah_F}}{\rho \cdot C_p} \approx 0 \quad (4.31)$$

Diante dos valores das duas diferenças de temperatura (pixel frio e quente), é necessário encontrar os valores das constantes a e b presentes na equação 4.28, estas constantes são determinadas segundo Nicacio (2008) considerando-se hipótese de linearidade entre dT e  $T_s$ .

#### 4.5.13.4 Correção da estabilidade atmosférica

As condições de estabilidade atmosféricas, segundo Nicacio (2008), têm um expressivo efeito sobre a resistência aerodinâmica, por tal razão é de suma importância que seja considerada no cálculo de H. Tais efeitos são tratados através do coeficiente de Monin-Obukov (L), que é expressão em função dos fluxos de calor e momento, conforme equação 4.32. No SEBAL, como se está trabalhando com imagens de satélites, há a necessidade de um processo iterativo nessa etapa para que se busque uma convergência

numérica entre a resistência aerodinâmica e a diferença de temperatura no pixel quente (ALLEN et al., 2002) e (BASTIAANSEN, 2000). A parte 4 da Figura 42 demonstra as etapas para o cálculo dos coeficiente de correção de calor e momento, realizados em função do coeficiente de Monin-Obukiv. O  $H$  encontrado anteriormente é utilizado como entrada para a estimativa do primeiro  $L$ .

$$L_{(x,y)} = -\frac{\rho \cdot C_p \cdot u^{*3} \cdot T_{s(x,y)}}{k \cdot g \cdot H_{(x,y)}} \quad (4.32)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $C_p$  o calor específico do ar à pressão constante ( $1004J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ );  $u^*$  é a velocidade de fricção ( $m \cdot s^{-1}$ );  $T_s$  a temperatura da superfície ( $K$ );  $K$  a constante de von Karman [-];  $g$  a constante gravitacional ( $9,81m \cdot s^{-2}$ ) e  $H$  o fluxo de calor sensível ( $W \cdot m^{-2}$ ).

O coeficiente de Monin-Obukov ( $L$ ) defini as condições de estabilidade atmosféricas, e seus valores estão relacionados as condições abaixo:

- $L < 0 \rightarrow$  Atmosfera instável;
- $L > 0 \rightarrow$  Atmosfera estável;
- $L = 0 \rightarrow$  Atmosfera neutra.

A depender do valor encontrado para  $L$ , os coeficientes de correção de estabilidade atmosférica para o transporte de calor e momento são escolhidos seguindo as equações 4.33 a 4.43.

Se  $L < 0$ :

$$\Psi_{m_{100(x,y)}} = 2 \cdot \ln \left( \frac{1 + x_{100(x,y)}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1 + x_{100(x,y)}^2}{2} \right) - 2 \cdot \arctan(x_{100(x,y)}) + 0,5 \cdot \pi \quad (4.33)$$

$$\Psi_{c_2(x,y)} = 2 \cdot \ln \left( \frac{1 + x_{2(x,y)}}{2} \right) \quad (4.34)$$

$$\Psi_{c_{0,1}(x,y)} = 2 \cdot \ln \left( \frac{1 + x_{0,1(x,y)}}{2} \right) \quad (4.35)$$

Em que:

$$x_{100(x,y)} = \left( 1 - 16 \cdot \frac{100}{L_{(x,y)}} \right)^{0,25} \quad (4.36)$$

$$x_{2(x,y)} = \left( 1 - 16 \cdot \frac{2}{L_{(x,y)}} \right)^{0,25} \quad (4.37)$$

$$x_{0,1(x,y)} = \left( 1 - 16 \cdot \frac{0,1}{L(x,y)} \right)^{0,25} \quad (4.38)$$

Se  $L > 0$ :

$$\Psi_{m_{100}(x,y)} = -5 \cdot \frac{100}{L(x,y)} \quad (4.39)$$

$$\Psi_{c_2(x,y)} = -5 \cdot \frac{2}{L(x,y)} \quad (4.40)$$

$$\Psi_{c_{0,1}(x,y)} = -5 \cdot \frac{0,1}{L(x,y)} \quad (4.41)$$

Se  $L = 0$ :

$$\Psi_{m(x,y)} = 0 \quad (4.42)$$

$$\Psi_{c(x,y)} = 0 \quad (4.43)$$

Esses coeficientes de correção, calculados através das equação supracitadas, são utilizados para a correção da velocidade de fricção (equação 4.44) e da resistência aerodinâmica (equação 4.45), como pode ser visto na etapa 5 e 6 da Figura 42. Como a correção altera os valores de  $r_{ah}$ , é necessário nesta etapa verificar a cada interação o valor da resistência aerodinâmica no pixel quente. Segundo Bastiaanssen (2000), é possível se observar convergência numérica entre os valores de  $r_{ah}$  e dT a partir da quinta interação.

$$u_{corr(x,y)}^* = \frac{u_{100} \cdot k}{\ln \left( \frac{100}{Z_{om(x,y)}} \right) - \Psi_{m_{100}(x,y)}} \quad (4.44)$$

$$r_{ah,corr(x,y)} = \frac{\ln \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right) - \Psi_{c(2)} + \Psi_{c(0,1)}}{u_{corr(x,y)}^* \cdot k} \quad (4.45)$$

#### 4.5.14 Fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ )

O termo residual do balanço de energia é denominado através do fluxo de calor latente, conforme equação 4.46. Essa equação faz referência ao fluxo de calor latente instantâneo, ou seja, ao momento da passagem do satélite (NICACIO, 2008).

$$\lambda ET_{(x,y)} = R_{n(x,y)} - G_{(x,y)} - H_{(x,y)} \quad (4.46)$$



Onde:  $\lambda ET$  é o fluxo de calor latente ( $W \cdot m^{-2}$ );  $R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $W \cdot m^{-2}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W \cdot m^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W \cdot m^{-2}$ ).

#### 4.5.15 Evapotranspiração real horária

A evapotranspiração real horária é facilmente estimada a partir do fluxo de calor latente, conforme equação 4.47 (TASUMI, 2003).

$$ET_{h(x,y)} = 3600 \cdot \frac{\lambda ET_{(x,y)}}{\lambda_{(x,y)}} \quad (4.47)$$

Sendo:  $ET_h$  a evapotranspiração real horária ( $mm \cdot h^{-1}$ );  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $J \cdot kg^{-1}$ ), que representa a energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água e 3600 representando a conversão de segundos para hora, conforma equação 4.48 (HARRISON, 1963), (NICACIO, 2008).

$$\lambda_{(x,y)} = [2,501 - 0,00236 \cdot (T_{s(x,y)} - 273,16)] \cdot 10^6 \quad (4.48)$$

onde  $T_s$  é a temperatura expressa em Kelvin (K).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta pesquisa implementou-se o algoritmo SEBAL através da linguagem LEGAL, linguagem livre encontrada no *software* nacional SPRING, aplicando os *scripts* implementados em uma área de estudo com a finalidade de avaliar o comportamento dos mesmos, estimando diversas componentes do SEBAL e avaliando os resultados alcançados com outros já existentes na literatura. Os *scripts* completos podem ser visto nos apêndices (A, B, C, D, E, F).

### 5.1 Implementação

#### 5.1.1 Implementação do algoritmo SEBAL através da linguagem LEGAL

##### 5.1.1.1 Algoritmo SEBAL Rn e G parte 1

Os resultados desta pesquisa foram divididos em seis *scripts* escritos através da linguagem LEGAL, o primeiro que será tratado nesta seção, é responsável por todos os cálculos iniciais até a estimativa do fluxo de calor no solo (G).

A implementação em LEGAL deste primeiro processo começou com a escolha do modelo de dados que seria adotado para as imagens, partindo dos conceitos dos dados em LEGAL, a categoria MNT foi considerada como a mais adequada, tendo em vista que envolve valores reais, necessários para a correta apresentação das variáveis calculadas.

Para que a equação 4.1 fosse ser escrita em LEGAL, declarou-se as variáveis necessárias para o seu cálculo, a posteriori instanciou-se as variáveis de campo e as reais e como último passo realizou-se as operações sobre as variáveis já declaradas e instanciadas, que pode ser visto na integra logo abaixo.

---

```

1 {
2 MNT banda1, banda2, banda3, banda4, banda5, banda6, banda7 ("CAT_MNT");
3 MNT radiancia1, radiancia2, ..., radiancia6, radiancia7 ("Radiancia_MNT");
4 MNT radianciabase1, radianciabase2, ..., radianciabase7 ("Radianciabase_MNT");
5
6 //Instanciacoes
7
8 banda1 = Recuperere (Nome = "TM1");
9 banda2 = Recuperere (Nome = "TM2");
10 ...
11 banda7 = Recuperere (Nome = "TM7");
12
13 radiancia1 = Novo(Nome = "TM1_radiancia", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
14 radiancia2 = Novo(Nome = "TM2_radiancia", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
15 ...
16 radiancia7 = Novo(Nome = "TM7_radiancia", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
17
```

---

```

18 radianciabase1 = Novo(Nome = "TM1_radianciabase", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
19 radianciabase2 = Novo(Nome = "TM2_radianciabase", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
20 ...
21 radianciabase7 = Novo(Nome = "TM7_radianciabase", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 50000);
22
23 // Coeficientes
24
25 Lmin1 = -1.52; // Valor a depender do ano da imagem
26 Lmin2 = -2.84; // Valor a depender do ano da imagem
27 ...
28
29 Lmax1 = 152.1; // Valor a depender do ano da imagem
30 Lmax2 = 296.61; // Valor a depender do ano da imagem
31 ...
32
33 radianciabase1 = (((Lmax1-(Lmin1))/255)*banda1)+(Lmin1);
34 radianciabase2 = (((Lmax2-(Lmin2))/255)*banda2)+(Lmin2);
35 ...
36 radianciabase7 = (((Lmax7-(Lmin7))/255)*banda7)+(Lmin7);
37
38 radiancia1 = (radianciabase1 < 0) ? 0 : radianciabase1;
39 ...
40 radiancia6 = (radianciabase6 < 0) ? 0 : radianciabase6;
41 radiancia7 = (radianciabase7 < 0) ? 0 : radianciabase7;
42 }

```

---

As linhas 01 a 06, do código abaixo, mostram as entradas que tem que ser efetuadas pelo usuário com os ângulos de elevação presente no arquivo \*.xml que se encontra junto da imagem utilizada, a linha 08 calcula uma média com os valores dos ângulos e os converte para ângulo zenital através da subtração por 90. Na mesma expressão encontrada na linha 08, é feita a conversão de graus para radianos, formato esse que é o utilizado para todas as expressões utilizadas no SEBAL.

---

```

1 {
2 anguloelevacao1 = _valor_; //Valor a depender da imagem
3 anguloelevacao2 = _valor_; //Valor a depender da imagem
4 anguloelevacao3 = _valor_; //Valor a depender da imagem
5 anguloelevacao4 = _valor_; //Valor a depender da imagem
6 anguloelevacao5 = _valor_; //Valor a depender da imagem
7 anguloelevacao7 = _valor_; //Valor a depender da imagem
8
9 teta =((90-((anguloelevacao1+anguloelevacao2+anguloelevacao3+anguloelevacao4+
   anguloelevacao5+anguloelevacao7)/6))*pi)/180;
10 }

```

---

Visando facilitar e agilizar o processo para se saber o valor da distância Terra-Sol, Foi colocado de forma comentada uma tabela contendo o valor da distância Terra-Sol (Anexo A). No processo de implementação da radiância, foi utilizado uma filtragem, que pode ser observado nas linhas 21 a 27, o objetivo deste expressão foi minimizar pequenos erros que podem ser encontrados nas imagens com a presença de pixels anômalos, a condicional expressa nestas linhas, atribui para qualquer pixel com radiância negativa, valor zero, caso contrário o valor calculado é mantido. Este processo evita a presença de

pixels com valores negativos, o que no fim da primeira etapa do SEBAL, iria gerar valores para saldo de radiação também negativos, valores estes inexistentes.

---

```

1 {
2
3 //Radiancia
4
5 //          (Lmax - Lmin)
6 // Radiancia = ----- * ND+ Lmin , onde
7 //          255
8
9 // Lmin = Radiancia espectral correspondente ao ND minimo
10 // Lmax = Radiancia espectral correspondente ao ND maximo
11 // ND = Numero digital
12
13 radianciabase1 = (((Lmax1-(Lmin1))/255)*banda1)+(Lmin1);
14 radianciabase2 = (((Lmax2-(Lmin2))/255)*banda2)+(Lmin2);
15 radianciabase3 = (((Lmax3-(Lmin3))/255)*banda3)+(Lmin3);
16 radianciabase4 = (((Lmax4-(Lmin4))/255)*banda4)+(Lmin4);
17 radianciabase5 = (((Lmax5-(Lmin5))/255)*banda5)+(Lmin5);
18 radianciabase6 = (((Lmax6-(Lmin6))/255)*banda6)+(Lmin6);
19 radianciabase7 = (((Lmax7-(Lmin7))/255)*banda7)+(Lmin7);
20
21 radiancia1 = (radianciabase1 < 0) ? 0 : radianciabase1;
22 radiancia2 = (radianciabase2 < 0) ? 0 : radianciabase2;
23 radiancia3 = (radianciabase3 < 0) ? 0 : radianciabase3;
24 radiancia4 = (radianciabase4 < 0) ? 0 : radianciabase4;
25 radiancia5 = (radianciabase5 < 0) ? 0 : radianciabase5;
26 radiancia6 = (radianciabase6 < 0) ? 0 : radianciabase6;
27 radiancia7 = (radianciabase7 < 0) ? 0 : radianciabase7;
28
29 }
```

---

Outra modificação realizada visando a melhoria de performance do algoritmo foi a entrada da média de altitude, conforme a linha 13 do *script* abaixo, esta média foi utilizada na equação da transmitância atmosférica, que por sua vez influência diretamente no albedo da superfície. Na linha 22 aparece um condicional, aplicado na equação do IAF, onde a formulação utilizada irá depender diretamente do valor do SAVI de cada pixel, o condicional analisa pixel a pixel da imagem e extrai a condição que: Se no pixel o SAVI é maior que 0,69, então se aplica a primeira expressão, caso contrário, é aplicada a segunda.

---

```

1 {
2
3 //Albedo Superficie (Albedo_SUP);
4
5 //          aTOA(x,y) - apath _ rad
6 // asup(x,y) = -----
7 //          t^2
8
9 //t = 0.75 + 2 * 10^-5 * z
10
11 Apathrad = 0.03;
12
13 mediaaltitude = _valor_; //Valor a depender da area de estudo
14
15 tau = 0.75+(2*(10^-5))*mediaaltitude;
16
17 albedosupnumerico = (albedotoanumerico - Apathrad)/(tau^2);
18
19
20 //IAF
21
22 iafnumerico = (savinumerico > 0.69) ? -log(((0.69)/0.59))/0.91 : -log(((0.69-savinumerico)
    )/0.59))/0.91;
23
24 }

```

---

Para atender todos os condicionais exigidos para se calcular a emissividade foi necessário a criação de uma emissividade inicial, que foi condicionada ao IAF e outra final expressa nas linhas 14 e 16 que são condicionadas ao NDVI e ao albedo da superfície. A temperatura da superfície foi expressa em LEGAL, através das equações presentes nas linhas 29 e 30, a primeira calcula o valor em graus Celsius e a segunda em Kelvin.

---

```

1 {
2
3 //Emissividade da Superficie
4
5 // eNB = 0.97 + 0.0033 * IAF
6
7 // e = 0.95 + 0.01 * IAF
8
9 epsilonNB1 = (iafnumerico < 3) ? 0.97 + 0.0033 * iafnumerico : 0.98;
10
11 epsilon1 = (iafnumerico < 3) ? 0.95 + 0.01 * iafnumerico : 0.98;
12
13
14 epsilonNB = (ndvinumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.99 : epsilonNB1;
15
16 epsilon = (ndvinumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.985 : epsilon1;
17
18 //Temperatura Superficie
19
20 Rp = 0;
21 tau2 = 1;
22 Rsky = 0;
23
24 Rc = ((radiancia6 - Rp)/tau2)-((1-epsilonNB)*Rsky);
25

```

---

```

26 //k1 = 607.76;
27 //K2 = 1260.56;
28
29 tempsuperficie = ((1260.56/(log(((epsilonNB*607.76)/Rc)+1)))- 273);
30 tempsuperficiekelvin = (1260.56/(log(((epsilonNB*607.76)/Rc)+1)));
31
32 }

```

---

O final do primeiro *script* ocorre com a estimativa do fluxo de calor no solo, que em LEGAL foi expresso por um condicional, tendo como variável analisada o NDVI, caso o valor do pixel represente NDVI negativo, ou seja, valores sobre corpos d'água a expressão é simplificada, em caso de valores positivos, é obtido através de uma equação mais robusta, como pode ser visto na linha 06.

---

```

1 {
2
3 //Fluxo de Calor do Solo (G)
4
5
6 G = (ndvnumeric < 0) ? 0.3 * Rn : ((tempsuperficie / albedosupnumeric) * (0.0038 *
   albedosupnumeric + 0.0074 * (albedosupnumeric ^ 2)) * (1 - (0.98 * (ndvnumeric ^ 4)))) * Rn;
7
8 }

```

---

### 5.1.1.2 Algoritmo SEBAL fluxo sensível atmosfera neutra parte 2

Nesta segunda etapa, as declarações estão em quantidade bem inferior que a primeira parte, e as instanciações possuem funções de recuperação de componentes já estimadas na parte 1 do *script*, como pode ser visualizado nas linhas 13 e 14.

---

```

1 {
2 MNT savinumeric ("SAVI_MNT");
3 MNT tempsuperficiekelvin ("TempsupKELVIN");
4 MNT rahinicial ("Rah");
5 MNT Zomxy ("Zomxy");
6 MNT uasterisco ("U_asterisco");
7 MNT uasteriscoxy ("U_asteriscoxy");
8 MNT ucem ("U_cem");
9 MNT Zom ("Zom");
10
11
12
13 savinumeric = Recupere (Nome = "SAVI_numeric");
14 tempsuperficiekelvin = Recupere (Nome = "TempSupKelvin");
15 rahinicial = Novo (Nome = "RahInicial" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
16 Zomxy = Novo (Nome = "Zomxy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
17 uasterisco = Novo (Nome = "Uasterisco" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
18 ucem = Novo (Nome = "Ucem" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
19 Zom = Novo (Nome = "Zom" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
20 uasteriscoxy = Novo (Nome = "UasteriscoXY" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000);
21
22 //Fluxo de Calor Sensível (H)
23
24 //-----Condições de Atmosfera Neutra-----
25

```

---

```

26 //Comprimento de Rugosidade
27
28 h = 3; //Altura media da vegetacao nos arredores da estacao (m)
29
30 Zom = 0.12*h;
31
32
33 //Velocidade de friccao
34
35 ux = 2; //Velocidade do vento em uma altura Zx (Dados da Estacao)
36 Zx = 3; //Altura que foi medida a velocidade anterior (Dados da Estacao)
37 k = 0.41; //Constante de von Karman
38
39 uasterisco = (k*ux)/(log(Zx/Zom));
40
41
42 //Velocidade do vento a 100 m //verificar
43
44 ucem = (uasterisco)*((log(100/Zom)/k));
45
46 //Velocidade de friccao em todos os pixels
47
48 //Expressao proposta por Bastiaanssen
49
50 Zomxy = exp(-(5.809)+5.62*savinumerico);
51
52 uasteriscoxy = (k*ucem)/((log(100/Zomxy)));
53
54 //Resistencia Aerodinamica (rah)
55
56 Z1 = 0.1;
57 Z2 = 2;
58
59 rahinicial = (log(Z2/Z1))/(uasteriscoxy*k);
60
61
62 //-----Fim das Condicoes de Atmosfera Neutra-----
63
64 }

```

---

Neste segundo *script* existe uma maior intervenção por parte do usuário, tendo em vista que há necessidade de colocação de valores que são captados na estação meteorológica, na escrita dos algoritmos os pontos que necessitam de alguma compreensão para serem executados são seguidos por um comentário.

### 5.1.1.3 Algoritmo SEBAL L monin obukhov parte 3

Neste terceiro *script* foi implementado as equações necessárias para se estimar o L de Monin Obukhov, nesta parte do código é necessário que o usuário indique onde esta localizado os pixels âncoras da imagem utilizada, optou-se por identificar tais pixels através do valor corresponde a sua linha e sua coluna, como pode ser visto abaixo:

---

```

1 {
2
3 //Determinar a localizacao linha/coluna do pixel quente
4 linhaquente = _valor_;
5 colunaquente = _valor_;
6
7 //Determinar a localizacao linha/coluna do pixel frio
8 linhafria = _valor_;
9 colunafria = _valor_;
10
11 }

```

---

Com o auxílio dos tecnologistas João Pedro Cerveira Cordeiro e Carlos Alberto Felgueiras, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi possível a implementação dentro do SPRING de uma função extremamente necessária para esta pesquisa, a busca de valores por localização (linhas/colunas, X/Y ou lat/long), exemplos da utilização dessas função segue como exemplo no código a seguir:

---

```

1 {
2
3 //Determinando e espacializando Rn do pixel quente
4
5 Rnquente = Rn.C == colunaquente && Rn.L == linhaquente ? Rn : 0;
6
7 //Determinando e espacializando G do pixel quente
8
9 Gquente = G.C == colunaquente && G.L == linhafria ? G : 0;
10
11 }

```

---

Os valores de a e b para a determinação da diferença de temperatura, foi automatizado dentro do *script*, esta automatização necessita somente da escrita dos valores referentes a temperatura no pixel quente e no pixel frio, posteriormente, se inicia uma sequência de equações como vista das linhas 09 a 25, nas linhas 27 e 29, são calculados os valores de b e a, respectivamente. terminando na linha 34 com o valor da diferença de temperatura.

---

```

1 {
2
3 //valores da regressao linear
4
5 tempquentevar = _valor_; //rodar a primeira vez com o valor 0 e depois de obter os
   valores dos pixels quente e frio substituir
6 tempfrioar = _valor_; //rodar a primeira vez com o valor 0 e depois de obter os valores
   dos pixels quente e frio substituir
7
8
9 tempmedia = (tempquentevar + tempfrioar) / 2;
10
11 tempsoma = (tempquentevar + tempfrioar);
12
13 dtsoma = (dtfrio + dtquente);
14
15 dtmedia = (dtfrio + dtquente) / 2;

```



---

```

16
17 xyfrio = tempfrioar * dtfrio;
18
19 xyquente = tempquentevar * dtquente;
20
21 x2frio = tempfrioar^2;
22
23 x2quente = tempquentevar^2;
24
25 x2soma = (x2frio + x2quente);
26
27 b = ((2 * xyquente) - (tempsoma * dtsoma)) / ((2 * x2soma) - (tempsoma^2));
28
29 a = (dtmedia) - (b * tempmedia);
30
31
32 //Diferenca de temperatura espacializada
33
34 dtxy = a + (b*tempsuperficiekelvin);
35
36 }

```

---

As últimas etapas do terceiro *script* culminam nas estimativas do fluxo de calor sensível inicial e o L de Monin Obukhov.

---

```

1 {
2
3 //Fluxo de calor sensível
4
5 Hxy = (p*Cp*dtxy)/(rahinicial);
6
7
8 //L de Monin Obukhov
9
10 k = 0.41; //constante de Von Karman
11 g = 9.81; // constante gravitacional
12
13 Lxy = -((p * Cp * (uasteriscoeficiente^3) * tempsuperficiekelvin) / (k * g * Hxy));
14
15 }

```

---

#### 5.1.1.4 Algoritmo SEBAL correção de instabilidade atmosférica e Rah corrigido parte 4

Nesta etapa da execução dos *scripts* implementados, foram calculadas as correções de estabilidade atmosférica e aplicados através de condicionais as equações necessárias para condições de atmosfera estável, instável e neutra, como pode ser visto nas linhas 32 a 34.

---

```

1 {
2
3 // Correcao da estabilidade atmosferica
4
5 x100 = (1 - (16 * (100 / Lxy)))^(0.25);
6 x2 = (1 - (16 * (2 / Lxy)))^(0.25);
7 x01 = (1 - (16 * (0.1 / Lxy)))^(0.25);
8

```

```

9 // Se Lxy>0 Estavel
10 // Se Lxy<0 Instavel
11 // Se Lxy=0 Neutra
12
13 psi100 = (Lxy > 0) ? -5*(100/Lxy) : (Lxy < 0) ? (2*(log(1+x100))/2) + ((log(1+(x100^2))
      /2)) - (2*(atan(x100))) + (0.5*PI) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
14 psi2 = (Lxy > 0) ? -5*(2/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x2^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
15 psi01 = (Lxy > 0) ? -5*(0.1/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x01^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
16
17 }

```

---

Ao fim deste processo é executada a correção da velocidade de fricção e da resistência aerodinâmica, operações vistas nas linhas 07 e 14, respectivamente.

```

1 {
2
3 //U asterisco corrigido
4
5 k = 0.41; //Constante de von Karman
6
7 uasteriscocorrigido = (k*ucem)/((log(100/Zomxy))-(psi100));
8
9 //Resistencia aerodinamica corrigida
10
11 Z1 = 0.1;
12 Z2 = 2;
13
14 rahcorrigido = ((log(Z2/Z1))-psi2+psi01)/(uasteriscocorrigido*k);
15
16 }

```

---

#### 5.1.1.5 Algoritmo SEBAL processo iterativo parte 5

O quinto *script* é uma mesclagem entre as parte 3 e 4 supracitadas, porém com particularidades que o tornam bastante complexo. O fluxo de calor sensível exige um processo iterativo que visa a convergência numérica entre resistência aerodinâmica e a diferença de temperatura, ambos no pixel quente. Este processo foi implementado gerando a necessidade do usuário, alterar as instanciações e as operações para que o processo ocorra de forma satisfatória, para melhor exemplificar segue abaixo trechos do código.

```

1 {
2
3 //rahinteracao1 = Novo( Nome = "Interacao1_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
      );
4 rahinteracao1 = Recupere( Nome = "Interacao1_Rah" );
5 //rahinteracao2 = Novo( Nome = "Interacao2_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
      );
6 rahinteracao2 = Recupere( Nome = "Interacao2_Rah" );
7 //rahinteracao3 = Novo( Nome = "Interacao3_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
      );
8 rahinteracao3 = Recupere( Nome = "Interacao3_Rah" );
9 //rahinteracao4 = Novo( Nome = "Interacao4_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
      );
10 rahinteracao4 = Recupere( Nome = "Interacao4_Rah" );

```

```

11 //rahinteracao5 = Novo( Nome = "Interacao5_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
12 rahinteracao5 = Recupere( Nome = "Interacao5_Rah" );
13 //rahinteracao6 = Novo( Nome = "Interacao6_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
14 rahinteracao6 = Recupere( Nome = "Interacao6_Rah" );
15 //rahinteracao7 = Novo( Nome = "Interacao7_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
16 rahinteracao7 = Recupere( Nome = "Interacao7_Rah" );
17 rahinteracao8 = Novo( Nome = "Interacao8_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
18 //rahinteracao8 = Recupere( Nome = "Interacao8_Rah" );
19 //rahinteracao9 = Novo( Nome = "Interacao9_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
20 //rahinteracao9 = Recupere( Nome = "Interacao9_Rah" );
21 //rahinteracao10 = Novo( Nome = "Interacao10_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
22 //rahinteracao10 = Recupere( Nome = "Interacao10_Rah" );
23
24 //Para o dt quente e necessario a espacializacao do valor de rahcorrigido quente
25
26 rahcorrigidoquente = rahinteracao_valor_.C == colunaquente && rahinteracao_valor_.L ==
    linhaquente ? rahinteracao_valor_ : 0; //Necessario antear o nome rahcorrigido por
    rahinteracao(x) a depender do numero de interacao
27
28 //Fluxo de calor sensivel
29
30 Hxyfim = (p*Cp*dtxy)/(rahcorrigido);
31
32 }

```

Como pode ser vista nas linhas 03 a 23, a interação tem que existir entre os valores de  $R_{ah}$  e  $dT$ , neste algoritmo optou-se por guardar todos os valores de  $R_{ah}$  e somente o último  $dT$  calculado, para assim manter o histórico das resistências de cada interação. Para conseguir fazer este processo, o usuário tem que a cada rodada comentar e descomentar as instanciações pertinentes a resistência, para a primeira rodada, somente a variável por nome "rahinteracao1" com o operador Novo, presenta na linha 03, deve estar descomentada, ao rodar o *script* e perceber que o processo precisa ser repetido, se comenta a linha 03 e descomenta a linha 04 e 05, e assim o processo se repete sucessivamente.

Outro local que é necessário a intervenção do usuário é na busca da resistência aerodinâmica do pixel frio, como pode ser visto na linha 25, onde a mesma possui um comentário que explica a operação. A cada interação é necessário a alteração do termo "valor" pelo número correspondente a interação, assim o processo é repetido diversas vezes, com os procedimentos já mencionadas nos processos 03 e 04 até chegar ao ápice com a estimativa do fluxo de calor sensível final, expresso na linha 29.

#### 5.1.1.6 Algoritmo SEBAL fluxo de calor latente, evapotranspiração real horária parte 6

No último *script* implementado, ocorre a estimativa do do fluxo de calor latente, através da subtração do saldo de radiação pelo fluxo de calor do solo e o fluxo de calor

sensível final, encontrado pelo processo de interações do *script* anterior, como pode ser visto na linha 23, após este processo, existe a estimativa da variável final proposta nesta pesquisa que é a evapotranspiração real horária.

---

```

1 {
2
3 MNT Rn ("Rn_MNT");
4 MNT G ("G");
5 MNT Hxyfim ("Interacoes");
6 MNT tempsuperficiekelvin ("TempsupKELVIN");
7 MNT albedosupnumerico ("AlbedoSUP_MNT");
8 MNT lambdaET ("Fluxo_CalorLatente");
9 MNT ETh, lambdaxy ("Evapo_realHoraria");
10
11
12 Rn = Recupere ( Nome = "Rn_numerico" );
13 G = Recupere ( Nome = "G" );
14 Hxyfim = Recupere ( Nome = "H_xyFIM" );
15 tempsuperficiekelvin = Recupere ( Nome = "TempSupKelvin" );
16 albedosupnumerico = Recupere ( Nome = "AlbedoSUP_numerico" );
17 lambdaET = Novo( Nome = "LambdaET" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
18 ETh = Novo( Nome = "ETh" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
19 lambdaxy = Novo( Nome = "Lambdaxy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
20
21 //Fluxo de Calor Latente (LambdaET)
22
23 lambdaET = Rn - G - Hxyfim;
24
25 //Evapotranspiracao Real Horaria
26
27 lambdaxy = (2.501 - (0.00236) * (tempsuperficiekelvin - (273.16)))*(10^6);
28
29 ETh = 3600 * (lambdaET/lambdaxy);
30
31 }

```

---

## 5.2 Aplicação

### 5.2.1 Estimativas dos fluxos de energia e evapotranspiração real horária na região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA por meio de sensoriamento remoto

Nesta fase foram avaliadas as respostas encontradas para as componentes estimadas através dos *scripts* desenvolvidos nessa pesquisa. A análise ocorreu por meio de mapas temáticos, representando os resultados das principais componentes do processo. Para melhorar as análises estatísticas foram separadas quatro áreas amostrais, representando: água, área irrigada, solo exposto e área urbana. Nos tópicos que seguem foram discutidos os resultados obtidos com o uso do SEBAL implementado através em LEGAL na região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA.

#### 5.2.1.1 Albedo da superfície

As Figuras 44 e 45 representam os mapas temáticos contendo a variação do albedo da superfície para a região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA, para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. O albedo proporciona o entendimento da quantidade de energia absorvida pela superfície terrestre, e atua diretamente no balanço de radiação.

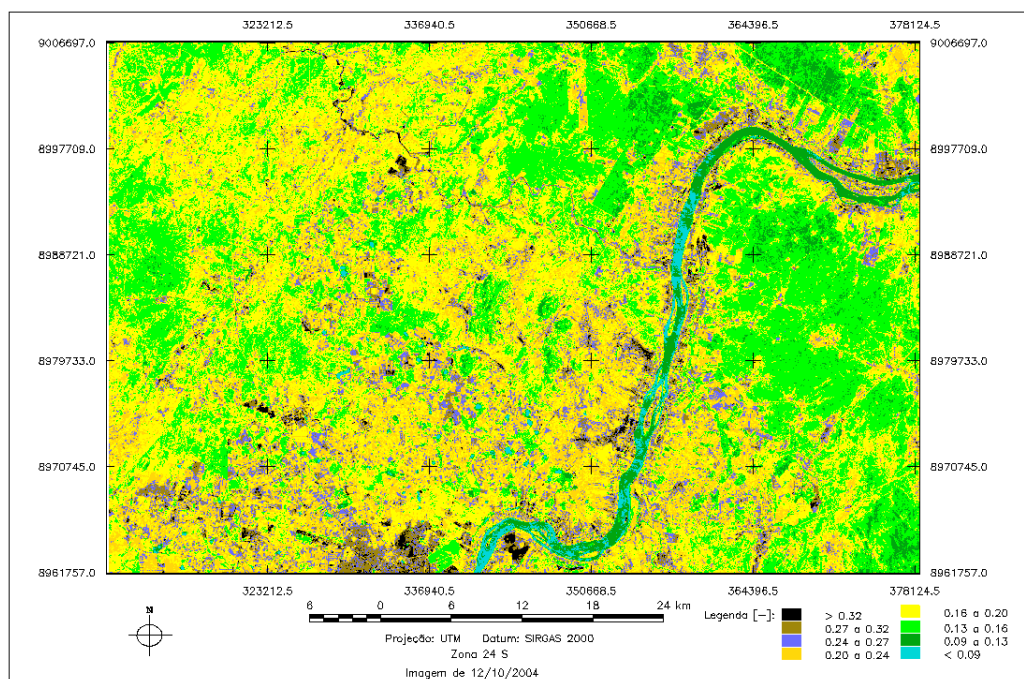


Figura 44 – Estimativa do albedo da superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 44 e 45, é perceptível que a região com valores mais baixos de albedo localizam-se exatamente sobre o leito do Rio São Francisco, valores estes que

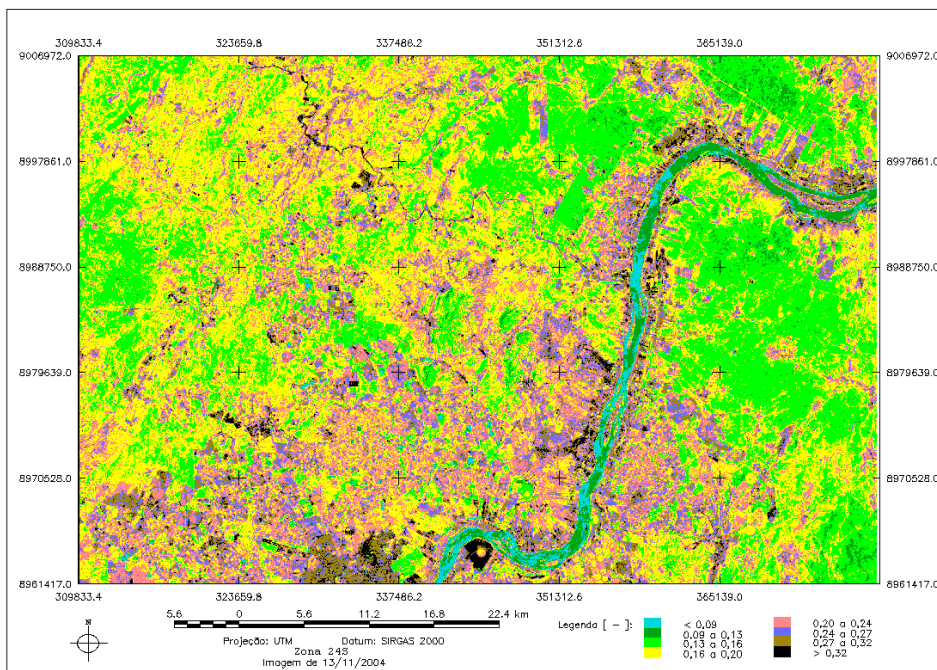


Figura 45 – Estimativa do albedo da superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

em sua maioria são menores que 0,09, ou seja 9%, estes valores são percebidos tanto para o dia 12/10/2004, quanto para o dia 13/11/2004. Nicacio (2008), encontrou para a mesma região de estudo valores que variaram de 3% a 9%; Gomes (2009), para a bacia de Mogi-Guaçu, encontrou valores menores que 9%; Meireles (2007), em estudo realizado em bacias hidrográficas, encontrou valores variando entre 3% e 10% e Shuttleworth (1993), em estudo sobre superfícies de água encontrou valores de albedo iguais a 0,08. Todos os valores supracitados, estão com similaridade aos encontrados nesta pesquisa.

A região com área urbana, próximo ao Rio São Francisco, possui os maiores valores de albedo, para as duas datas estudadas, as estimativas obtiveram valores variando de 24% a maiores que 32%, valores estes que foram vistos também em regiões de solo exposto. Nicacio (2008), encontrou valores de albedo entre 24% e 27% para áreas urbanas e de 27% a 32% para áreas de solo exposto. Os valores desta pesquisa também corroboram com valores sugeridos por Shuttleworth (1993), que indica valores de 35% para solo seco e 10% para solo úmido, como nesta pesquisa se utiliza do SEBAL implementado em ambiente livre a condição de solo seco é uma necessidade do algoritmo, logo, os valores são condizentes com os estimados nesta pesquisa.

As áreas com valores de albedo variando entre dois grupos: 16% a 20% e 20% a 24%, são regiões onde a fruticultura irrigada possui maior força. Tasumi (2003), em estudo sobre culturas no Estados Unidos da América (EUA), observou valores entre 16% e 24%; Nicacio (2008), achou valores similares aos dessa pesquisa, e atribuiu a variação a grande diversidade de culturas existentes na região. A área de vegetação nativa possui valores de

albedo que variam de 0,13 a 0,16..

O diagrama de caixas mostrado na Figura 46, apresenta as informações sobre os valores do albedo para a amostra de água das imagens estudadas. Pode-se observar que a amostra do dia 12/10/2004 obteve uma maior simetria nas informações de albedo analisadas, observando-se uma amplitude interquartílica de 0,006 contra 0,007 dos dados da imagem de 13/11/2004. As medianas encontradas foram 0,09 e 0,08 para 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente.

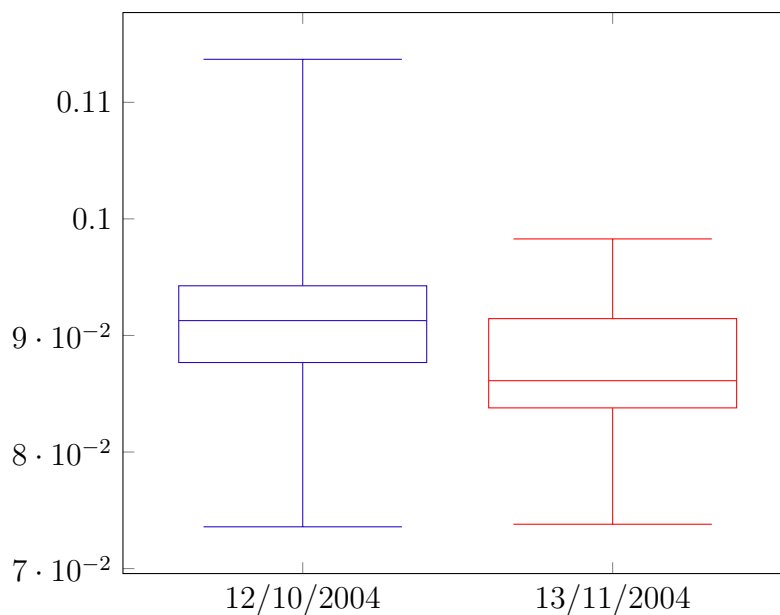


Figura 46 – Amostras de água, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

Para as amostras de área irrigada, os resultados podem ser vistos na Figura 47, onde é apresentado o diagrama de caixas para esta variável nas datas analisadas. A imagem do dia 13/11/2004 possui maior simetria entre as informações e uma mediana de 0,22 enquanto na imagem do dia 12/10/2004 a maioria das informações possuem valores maiores que a mediana que é correspondente a 0,19.

Nas Figura 48 e 49, são apresentados os digramas de caixa para as amostras de área urbana e solo exposto, respectivamente. Analisando os diagramas de caixa referentes as amostras de área urbana, presente na Figura 48, observa-se que suas variações interquartílicas são muito próximas, com valores 0,01 para as duas datas estudadas, tendo como mediana os valores de 0,26 e 0,28 para 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. A variação interquartílica das amostras de solo exposto (Figura 49), são maiores, com valores 0,02 para ambas as imagens, as medianas alcançaram valores bem próximos sendo de 0,23 para o dia 12/10/2004 e 0,25 para 13/11/2004.

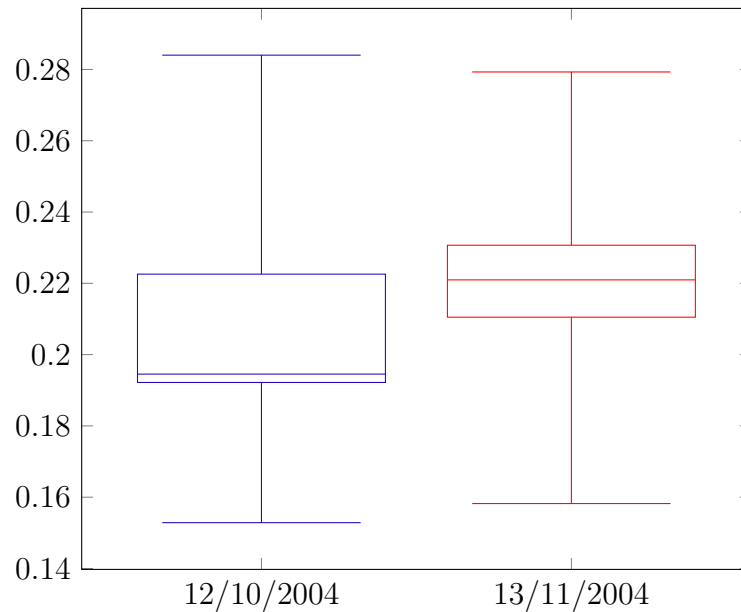


Figura 47 – Amostras de área irrigada, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

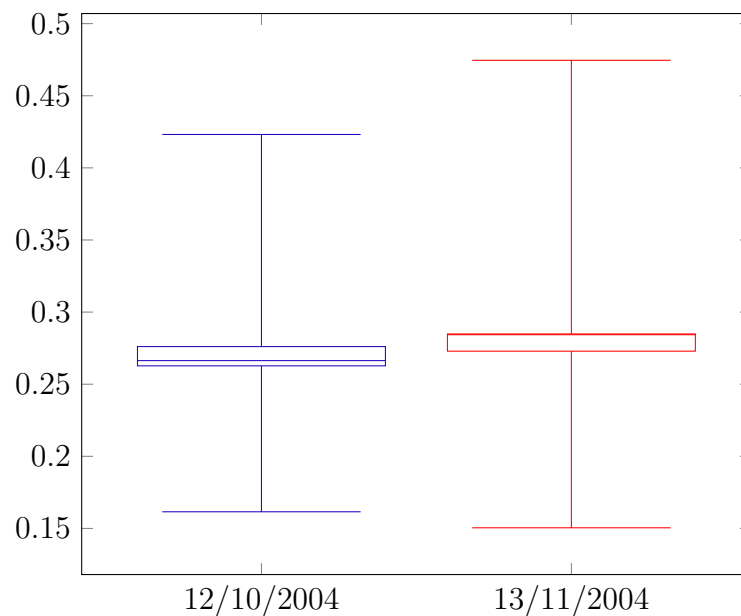


Figura 48 – Amostras de área urbana, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

#### 5.2.1.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

As Figuras 50 e 51 mostram a variação do NDVI para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Como observado nos mapas os valores sobre corpos de água localizados sobre o leito do Rio São Francisco e em alguns açudes espalhados entre as culturas irrigadas. Tais valores são consistentes com a literatura, que determina para corpos de água valores de NDVI negativos (SINGH; ROY; KOGAN, 2003). O NDVI representa o verdor vegetativo, ou seja, quanto mais verde uma vegetação maior será o seu NDVI,



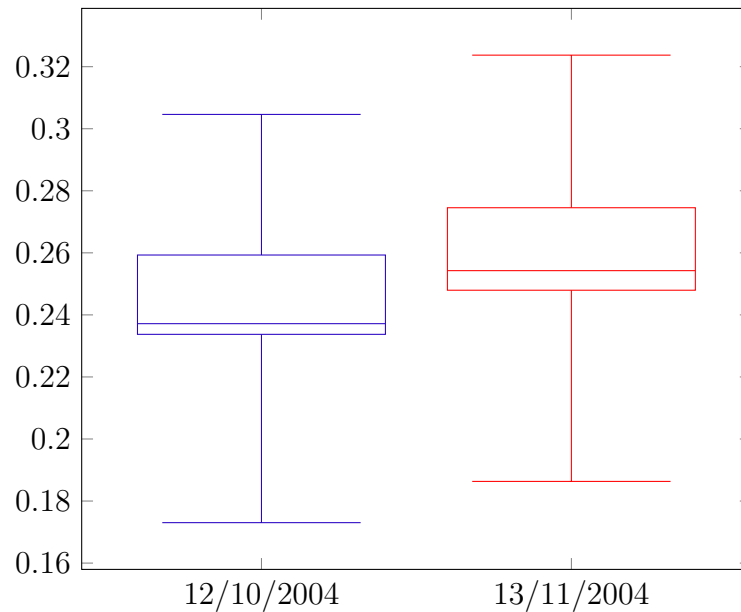


Figura 49 – Amostras de solo exposto, referentes ao Albedo da Superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

quanto menos verde mais baixo serão os valores.

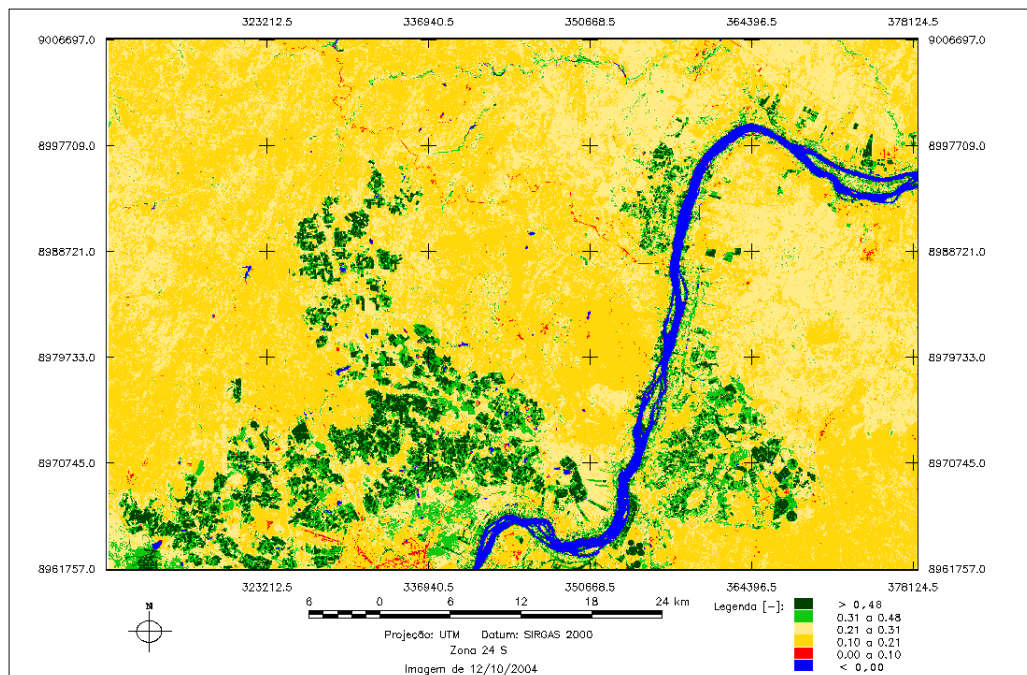


Figura 50 – Estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando os mapas acima observa-se que a área urbana possui valores variando entre 0,00 a 0,10 e 0,10 a 0,21; valores que também são encontrados no canal localizado a norte da imagem, começando no Rio São Francisco e seguindo em direção sudeste. Os valores entre 0,10 a 0,21 são os mais encontrados em ambas as imagens, isto é explicado

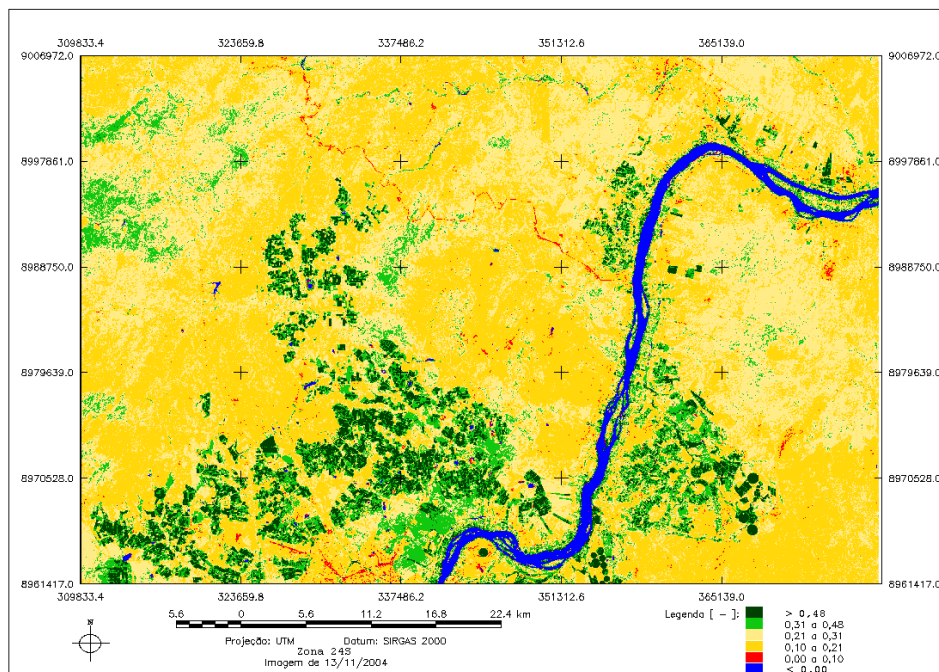


Figura 51 – Estimativa do índice de vegetação por diferença normalizada para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

devido a área em estudo esta localizada em pleno sertão nordestino, área semiárida com regime pluviométrico baixo.

As regiões de fruticultura irrigada apresentaram valores em ambas as imagens variando entre 0,31 a maiores de 0,48, tais valores são pertinentes por se tratar de áreas de irrigação, observa-se a presença de pivô central a sudoeste do mapa, com altos valores de NDVI.

O diagrama de caixa apresentado na Figura 52, mostra as estatísticas das amostras de água para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, como esperado todos os valores encontram-se em intervalos negativos, com medianas de -0,26 e -0,35, correspondendo as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004.

Para as amostras de área irrigada, observa-se através dos diagramas de caixa, que a variação interquartilica é bastante expressiva, obtendo valores de 0,19 e 0,18 para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Tal fator pode ser explicado pela diversidade de culturas e necessidade hídrica de cada uma, que amplia os valores de verdor vegetativo. As medianas alcançadas foram de 0,49 para o dia 12/10/2004 e 0,46 para o dia 13/11/2004.

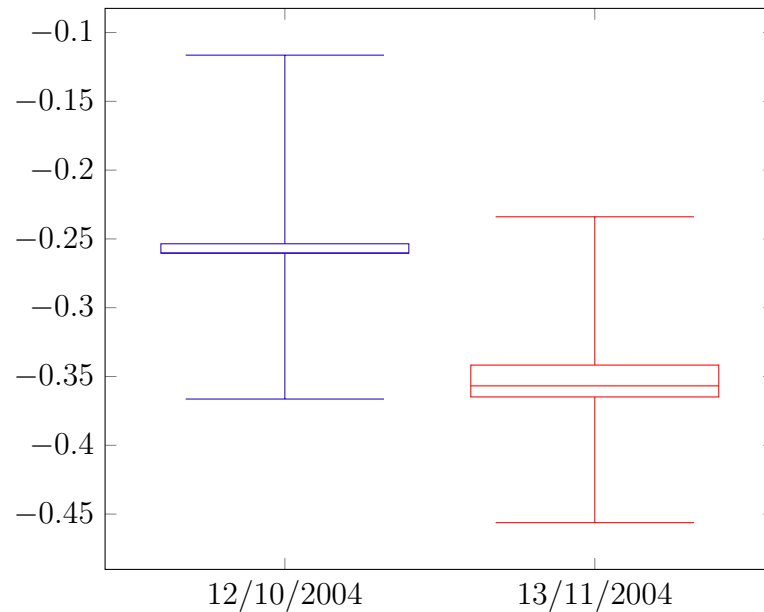


Figura 52 – Amostras de água, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

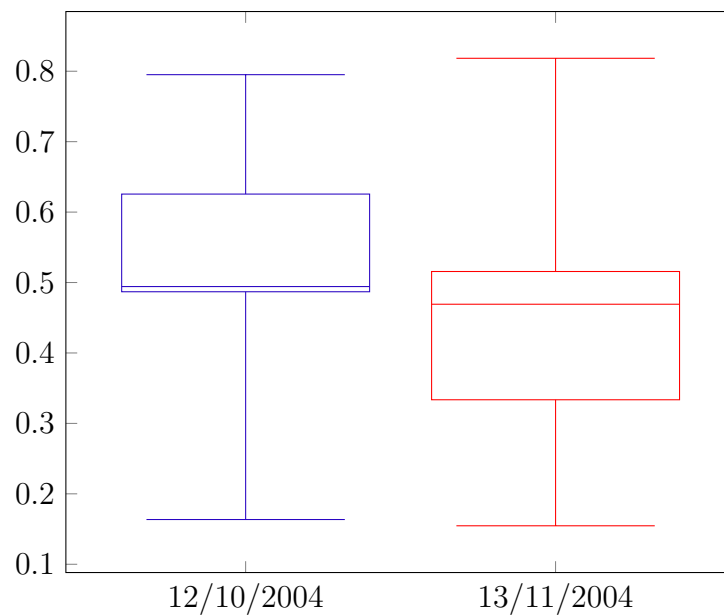


Figura 53 – Amostras de área irrigada, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As amostras de área urbana e solo exposto representadas através dos diagramas de caixas (Figura 54 e 55), são apresentadas juntas, pois possuem bastante semelhanças em suas estatísticas, possuindo uma mediana de 0,12 e 0,15 para a amostra de área urbana nas datas de 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Para as amostras de solo exposto dos referidos dias, foram encontradas medianas equivalentes a 0,20 e 0,18. Observa-se que são amostras com valores baixos de NDVI, o que está interligado com a condição de uma

área urbana e do solo exposto não possuem verdor vegetativo em grandes proporções.

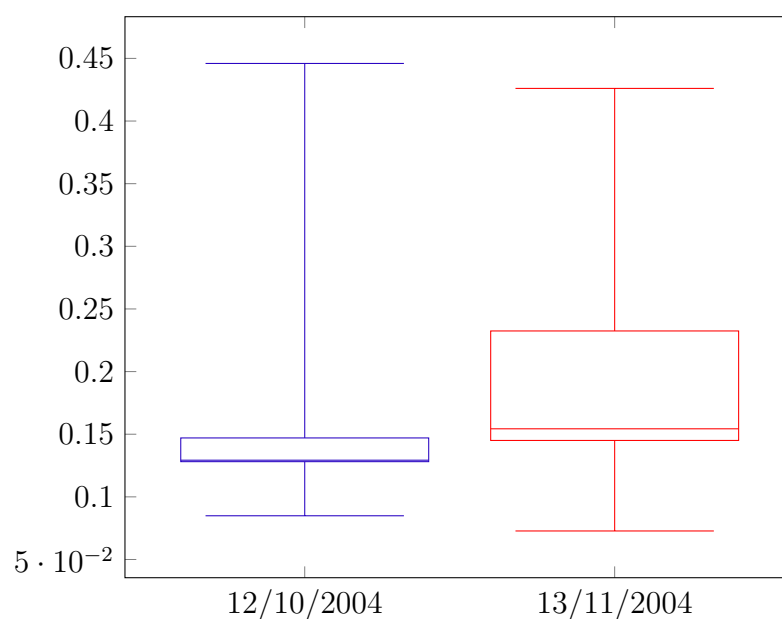


Figura 54 – Amostras de área urbana, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

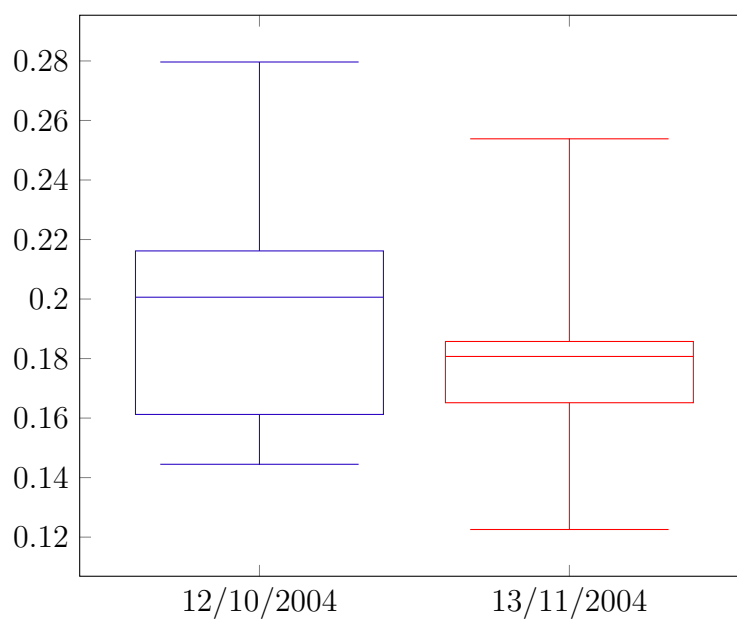


Figura 55 – Amostras de solo exposto, referentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

### 5.2.1.3 Temperatura da superfície

As Figuras 56 e 57 representam os mapas temáticos da espacialização da temperatura da superfície para a região do complexo irrigado de Petrolina-PE/Juazeiro-BA, correspondentes as datas de 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Observa-se através da análise dos mapas que as temperaturas mais frias estão localizadas sobre o leito do Rio São Francisco (regiões em verde mais escuro no mapa), alcançando valores de menores que  $20^{\circ}C$  e sobre as regiões de cultura irrigadas (regiões em verde mais claro no mapa), alcançando valores que variam entre  $35,0^{\circ}C$  e  $27,5^{\circ}C$ .

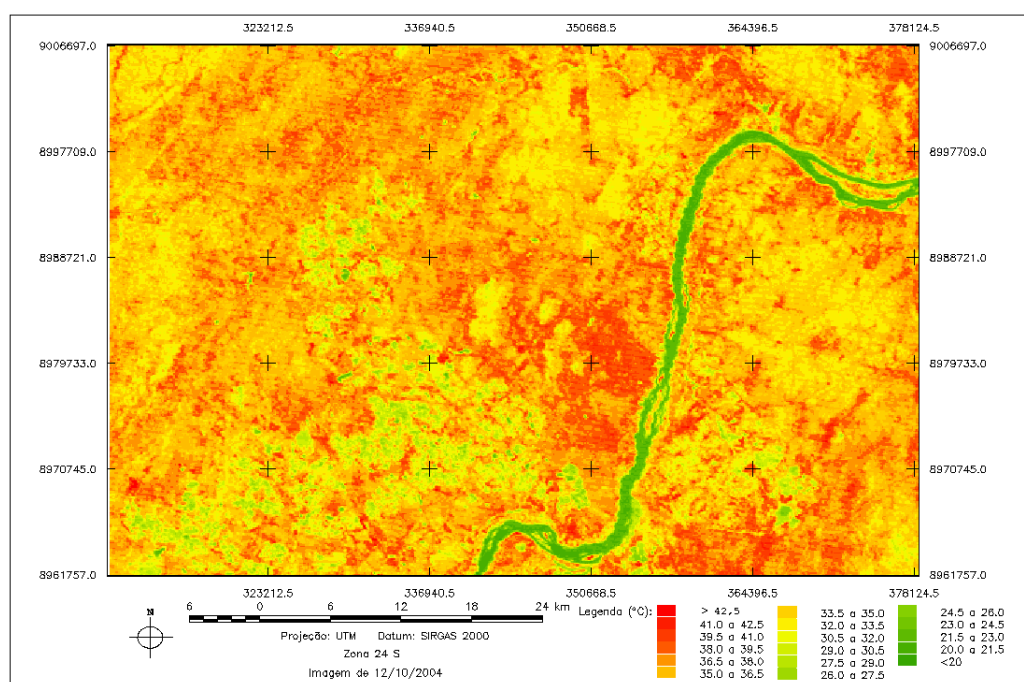


Figura 56 – Estimativa da temperatura da superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

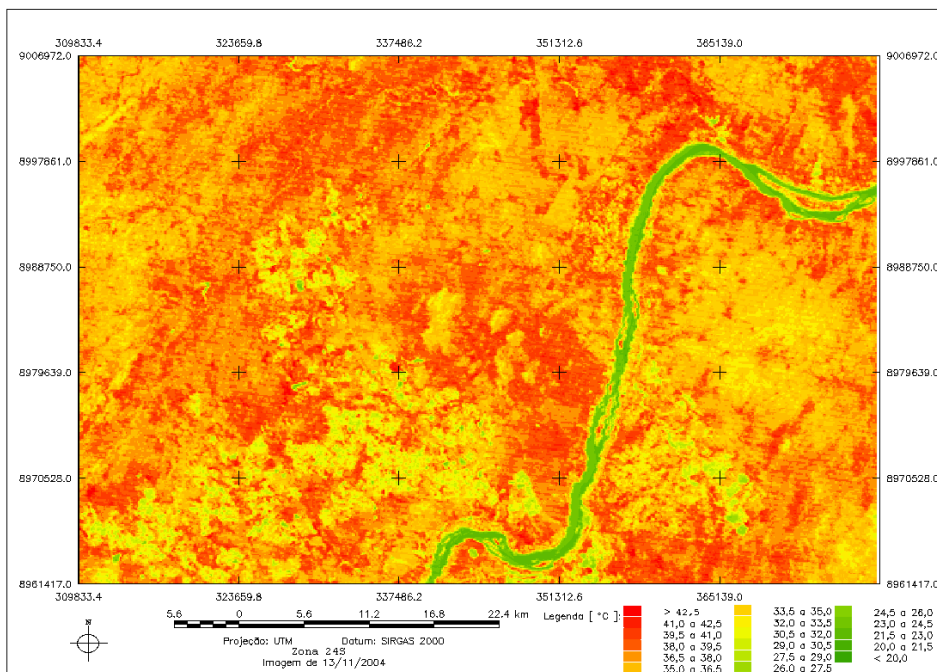


Figura 57 – Estimativa da temperatura da superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As regiões de maiores temperaturas no mapa localizam-se sobre áreas de solo exposto, tais regiões conseguem alcançar temperaturas superiores a  $42,5^{\circ}C$ .

Analisando os diagramas de caixa para as temperaturas da superfície nas amostras referentes a água (Figura 58). Observa-se que o diagrama referente ao dia 12/10/2004 possui a mediana similar ao valor do quartil inferior, equivalendo a  $21,22^{\circ}C$  e uma variação interquartílica pequena, com valor de  $0,44^{\circ}C$ . Os valores do diagrama para o dia 13/11/2004, se mostram pouco simétricos com um valor de mediana bem próximo ao valor do quartil inferior, sendo estes  $21,74^{\circ}C$  e  $21,66^{\circ}C$ ; respectivamente, e uma variação interquartílica de  $0,88$ .

O diagrama de caixa, representando os dados da amostra de área irrigada (Figura 59), devido a presença de alguma área sem cultura plantada, logo, com a presença de solo exposto, apresenta as temperaturas com picos máximos altos,  $38,2^{\circ}C$  e  $38,9^{\circ}C$  para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. A amostra do dia 12/10/2004 tem maior simetria da mediana com os quartis, possuindo variação interquartílica  $4,51^{\circ}C$  e mediana de  $31,24^{\circ}C$ , enquanto a amostra do dia 13/11/2004 possui mediana igual a  $33,68^{\circ}C$  e variação interquartílica de  $1,07^{\circ}C$ .

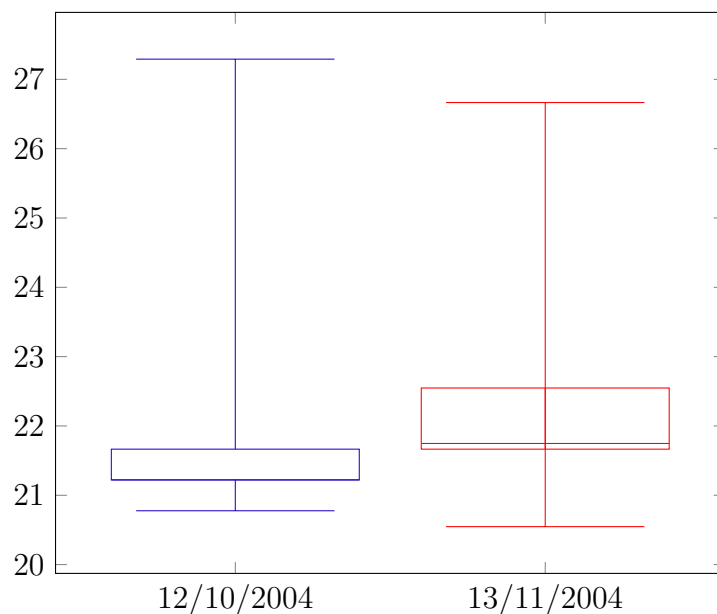


Figura 58 – Amostras de água, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

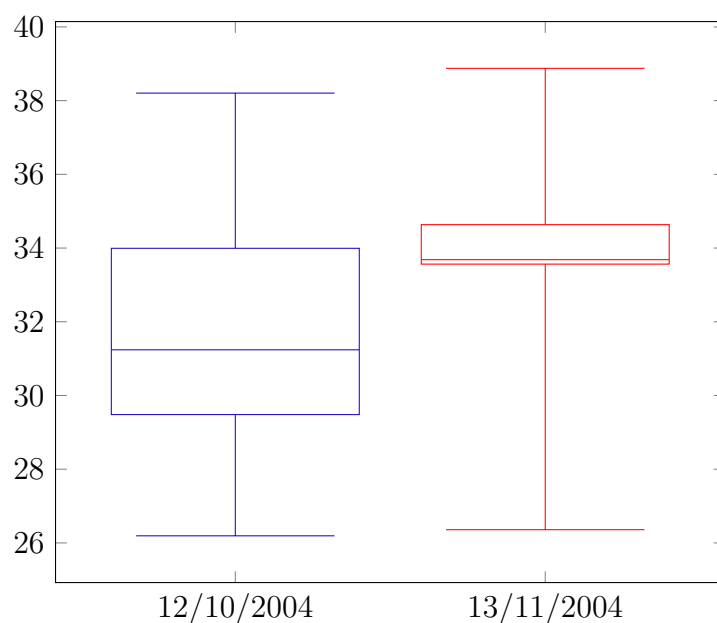


Figura 59 – Amostras de área irrigada, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As amostras de área urbana e solo exposto, expressas nas Figuras 60 e 61, através de seus diagramas de caixa, mostram que as amostras supracitadas são as que possuem maiores temperaturas dentre as demais. Observa-se que a temperaturas máximas alcançadas entre as amostras, ultrapassam os  $40,00^{\circ}C$ , somente a do dia 12/10/2004 referente a área urbana que alcançou um pico máximo de  $39,40^{\circ}C$ , todas as datas e amostras apresentam uma simetria entre os suas variações interquartílicas, sendo a maior variação encontrada na amostra de solo exposto do dia 13/11/2004 com valor de  $2,00^{\circ}C$ .

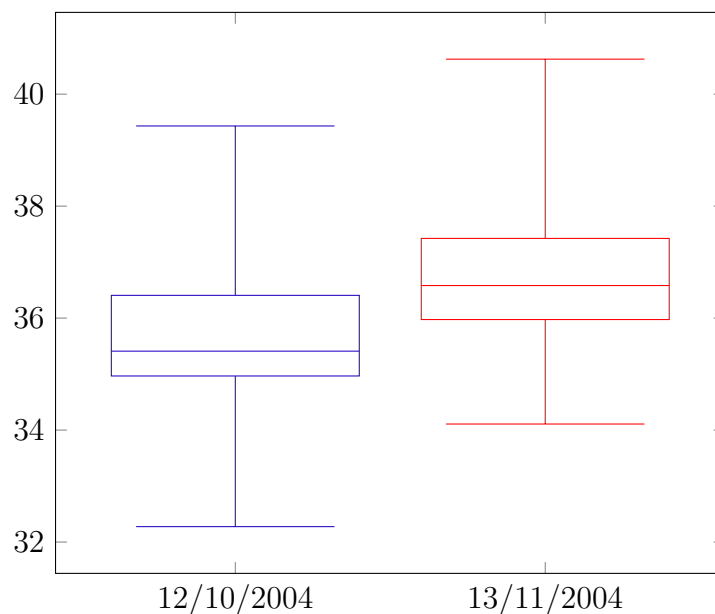


Figura 60 – Amostras de área urbana, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

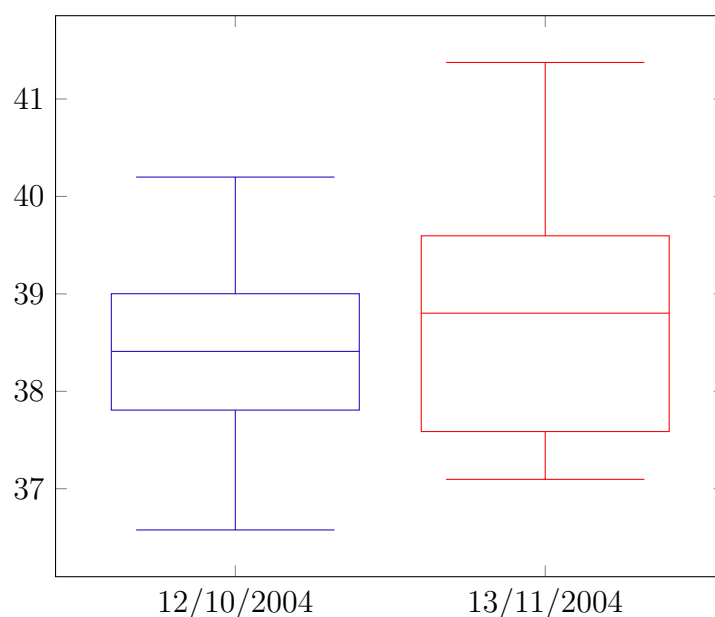


Figura 61 – Amostras de solo exposto, referentes a temperatura da superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

#### 5.2.1.4 Saldo de radiação

As Figura 62 e 63 mostram a estimativa espacializada do saldo de radiação à superfície obtidos com o uso dos scripts desenvolvidos nesta pesquisa e representam os valores das imagens do dia 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Os valores de saldo de radiação maiores que  $731,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  como pode ser observado nos mapas estão sobre as regiões de corpos de água. Nicacio (2008) em estudo na mesma região encontrou valores superiores a  $731,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; Gomes (2009), também encontrou a mesma faixa



de valor para estudo na bacia do Mogi-Guaçu. Corroborando ainda mais com os valores encontrados, Silva e Bezerra (2006); Folhes (2007) e Leivas et al. (2007), encontraram valores acima de  $712,0 W \cdot m^{-2}$ ,  $662,0 W \cdot m^{-2}$  e  $731,0 W \cdot m^{-2}$ , respectivamente. Tais valores são explicados quando observados que nos mapas de albedo da superfície, os valores mais baixos encontravam-se sobre os mesmos corpos de água, ou seja, mais energia sendo absorvida.

Os valores mais baixos de saldo de radiação (em vermelho no mapa) encontram-se na área urbana e nas regiões com solo exposto, alcançando valores menores que  $542,4 W \cdot m^{-2}$ , alinhado com estes valores Pace (2004), observou valores no entorno de Petrolina, em regiões de solo exposto, valores de  $424,8 W \cdot m^{-2}$ . Os valores entre  $622,0 W \cdot m^{-2}$  a  $680,0 W \cdot m^{-2}$ , foram predominantes em regiões de fruticultura irrigada, valores entre  $580,0 W \cdot m^{-2}$  e  $622,0 W \cdot m^{-2}$  também foram encontrados na região de fruticultura.

Os diagramas de caixa para a amostra de água encontrado na Figura 64, possui valores que estão em concordância com a análise visual feita por meio dos mapas temáticos, observa-se valores extremamente altos para a amostra de água, com medianas equivalentes a  $723,9 W \cdot m^{-2}$  e  $736,9 W \cdot m^{-2}$  para as datas de 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente.

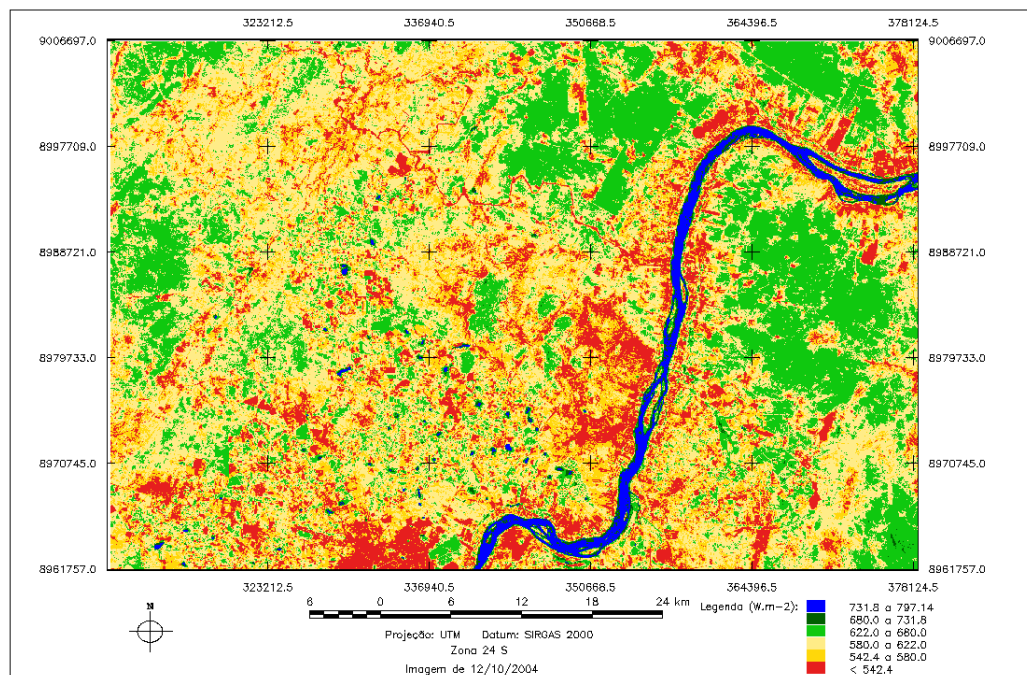


Figura 62 – Estimativa do saldo de radiação à superfície para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

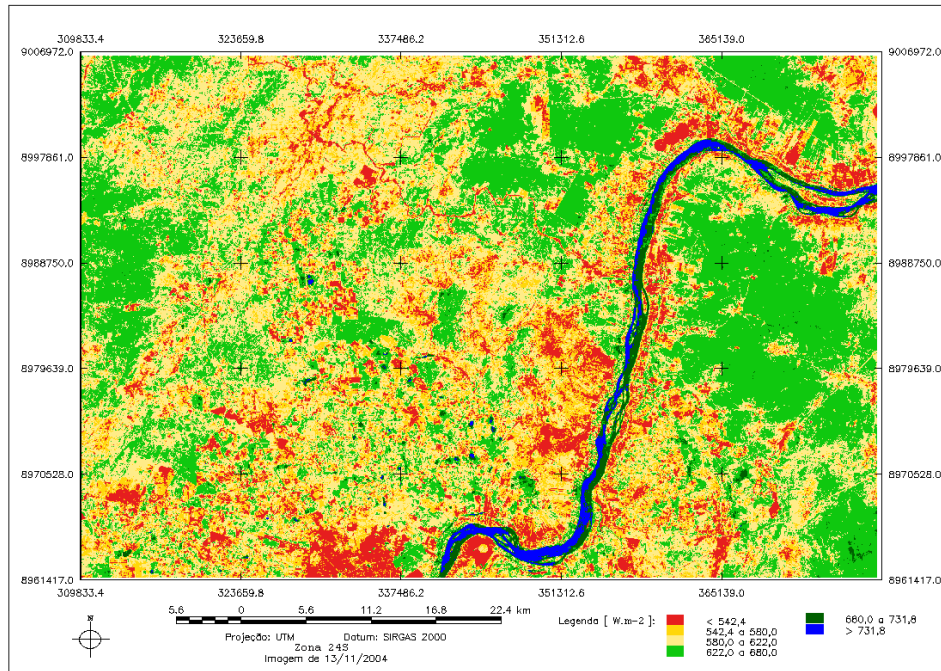


Figura 63 – Estimativa do saldo de radiação à superfície para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

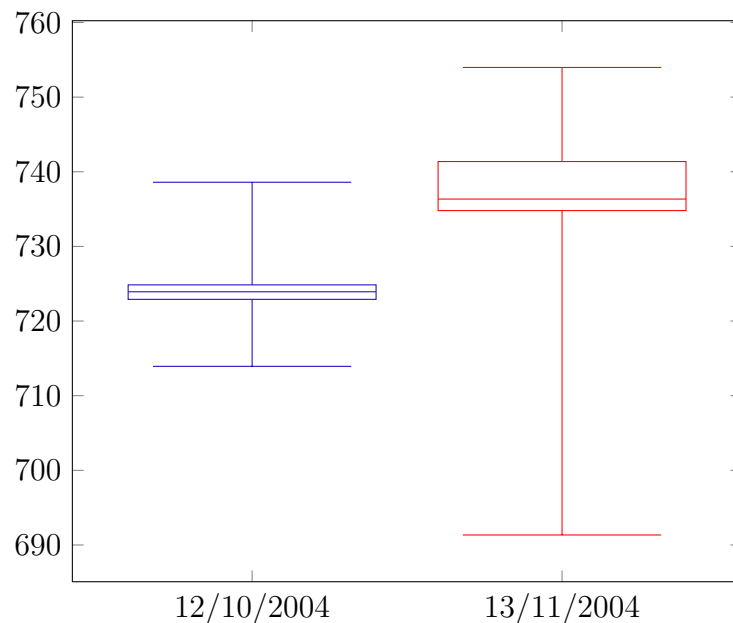


Figura 64 – Amostras de água, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 65, demonstra de forma estatística os valores referentes as área de cultura irrigada, observa-se que os valores máximos e mínimos estão na faixa apresentada anteriormente, entre  $580,0 W \cdot m^{-2}$  e  $680,0 W \cdot m^{-2}$ . A amostra referente ao dia 12/10/2004, possui mais simetria e mediana equivalente a  $575,7 W \cdot m^{-2}$ . A do dia 13/11/2004 possui a mediana muito próxima do quartil superior, com resultados, respectivamente equivalentes a  $555,7 W \cdot m^{-2}$  e  $556,4 W \cdot m^{-2}$ .

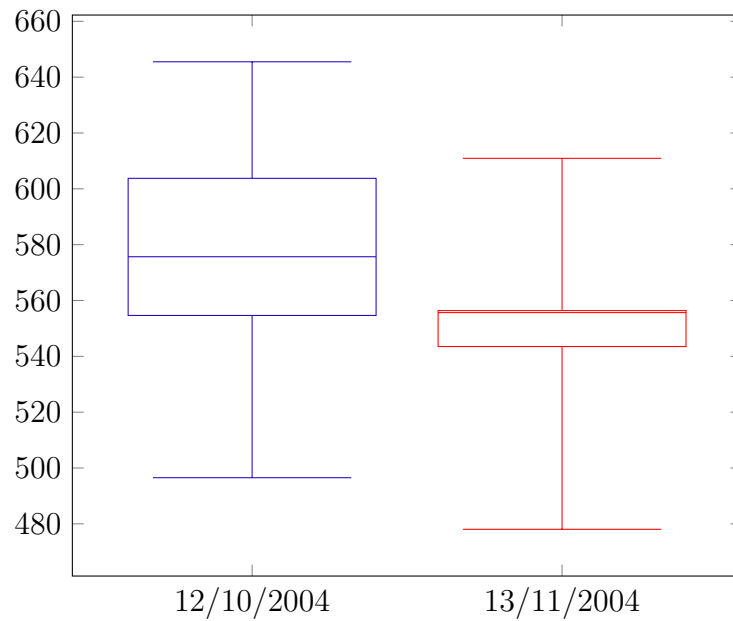


Figura 65 – Amostras de área irrigada, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As Figuras 66 e 67 são apresentadas juntas por possuírem características bem parecidas, tratam das amostras de área urbana e solo exposto abordando as duas datas utilizadas, 12/10/2004 e 13/11/2004. Como pode ser observado ambas possuem valores baixos de saldo de radiação e medianas que variam de  $459,0 W \cdot m^{-2}$  a  $500,7 W \cdot m^{-2}$ .

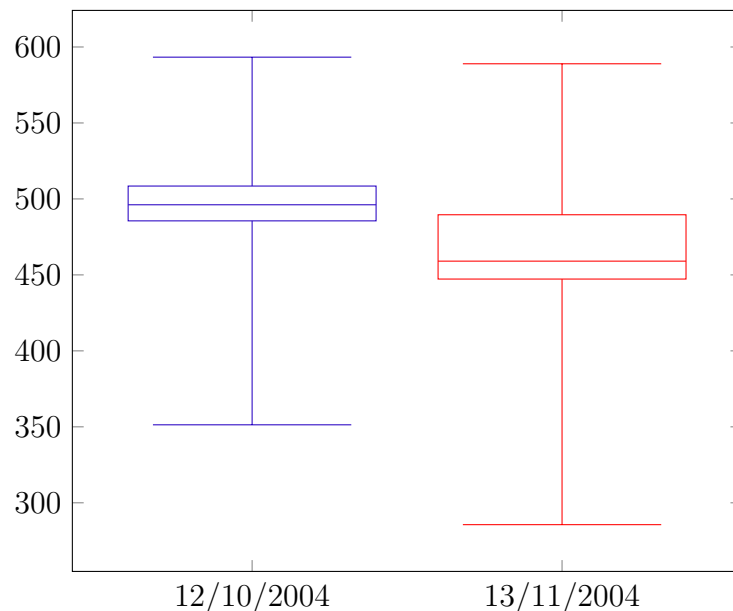


Figura 66 – Amostras de área urbana, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

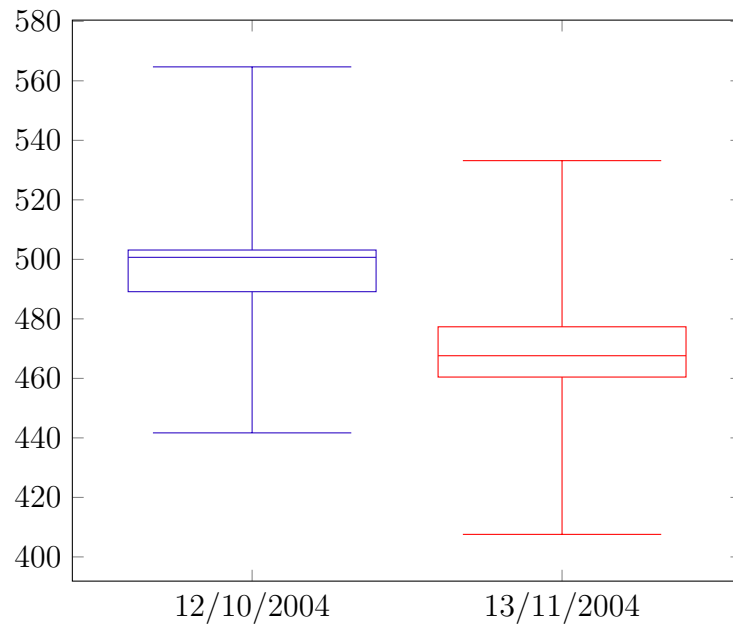


Figura 67 – Amostras de solo exposto, referentes ao saldo de radiação à superfície para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

#### 5.2.1.5 Fluxo de calor no solo

A variação espacial do fluxo de calor no solo, esta expressa através das Figuras 68 e 69, correspondendo aos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Observando os mapas, é percebido que os valores acima de  $200,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (área em vermelho no mapa), estão localizados sobre os corpos de água, valores estes similares aos encontrados por Nicacio (2008) e Gomes (2009), que encontraram variações maiores que  $224,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e entre  $160,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e maiores que  $200,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectivamente.

Analisando as áreas sobre fruticultura irrigada, observa-se que encontram-se na faixa de  $53,71$  a  $80,56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , e em algumas áreas valores entre  $80,56$  e  $107,41$ , tais resultados corroboram com os encontrados na literatura, como Silva e Bezerra (2006), que encontrou sobre áreas irrigadas valores inferiores a  $75,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e Nicacio (2008), que encontrou valores inferiores a  $96,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Os diagramas de caixa para as amostras de água (Figura 70) dos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, comprovam estatisticamente, os valores acima de  $200,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  em corpos de água. Para o dia 12/10/2004 a mediana obtida foi de  $220,9$  e a variação interquartílica foi de  $1,97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , no dia 13/11/2004 a mediana encontra foi de  $217,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  com uma variação interquartílica de  $0,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

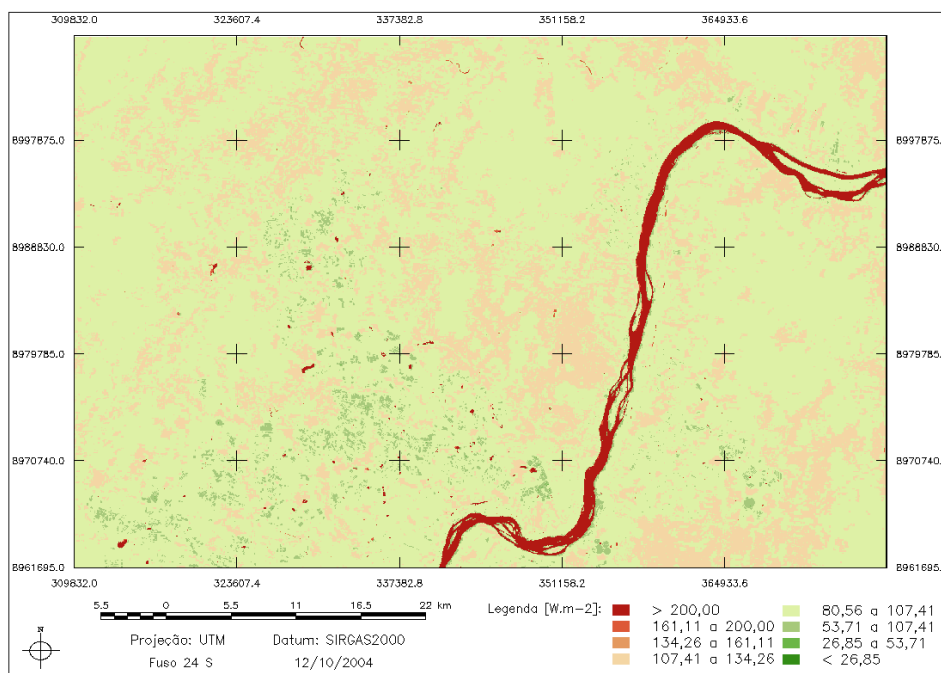


Figura 68 – Estimativa do fluxo de calor no solo para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

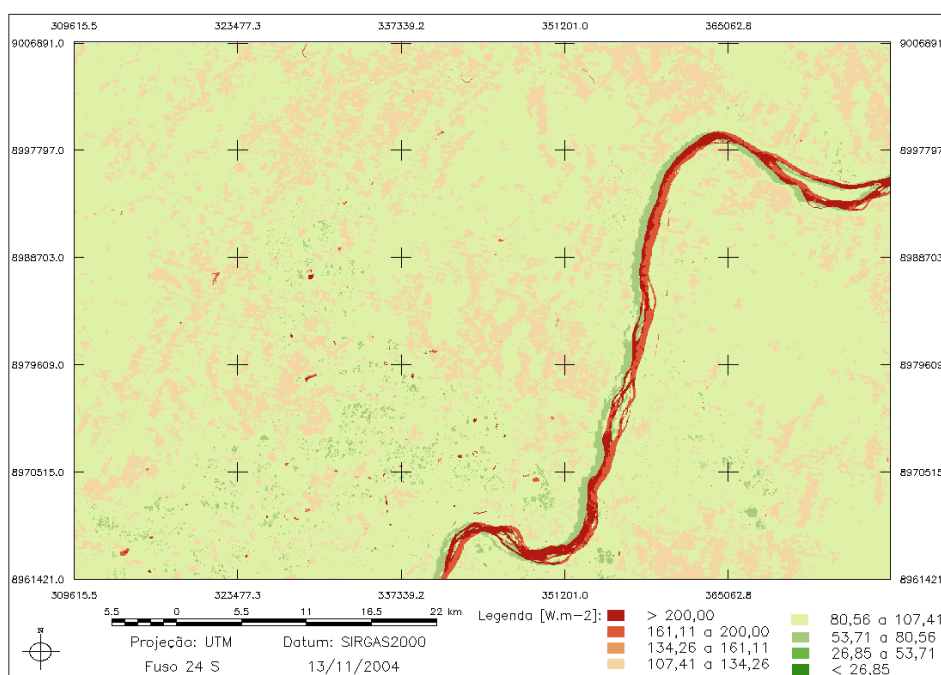


Figura 69 – Estimativa do fluxo de calor no solo para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 71, referente ao diagrama de caixa da amostra de área irrigada para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Apresenta em ambas as datas pequenas variações interquartílicas  $3,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  para o dia 12/10/2004 e  $4,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  para o dia 13/11/2004, com medianas de  $88,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $90,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; respectivamente. Observa-se que estes valores estão condizentes com a avaliação feita sobre os mapas temáticos.

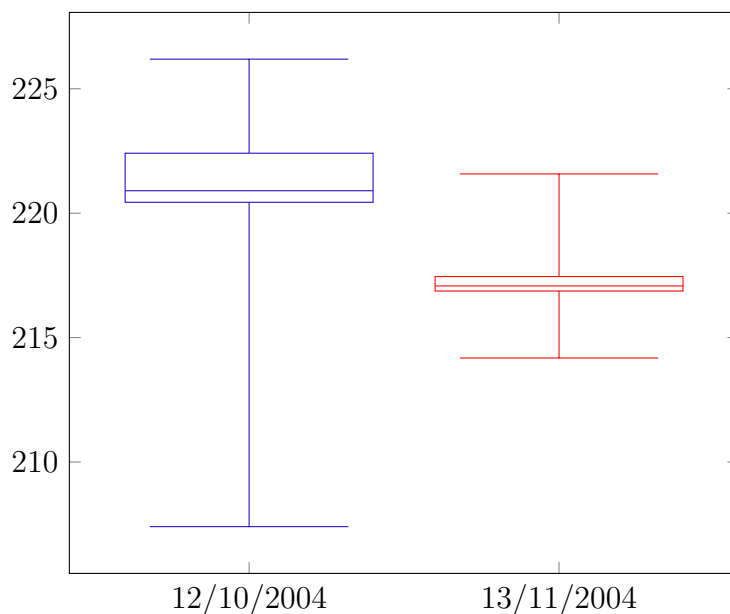


Figura 70 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

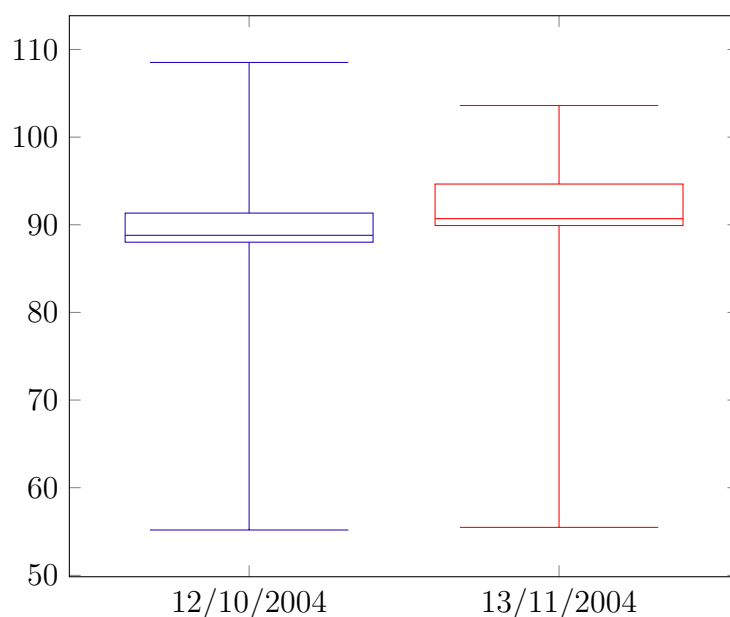


Figura 71 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As Figuras 72 e 73, representam os valores das amostras de área urbana e solo exposto, nos mapas temáticos já apresentados, estas regiões eram de difícil identificação da faixa de valores. Analisando os diagramas de caixa, observa-se que as amostras de área urbana possuem medianas equivalentes a  $99,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $98,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Apesar de possuir valores abaixo de  $95,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a maior parte da amostra apresenta valores superiores a  $95,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; com máximas alcançadas de  $154,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $156,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  para as respectivas datas

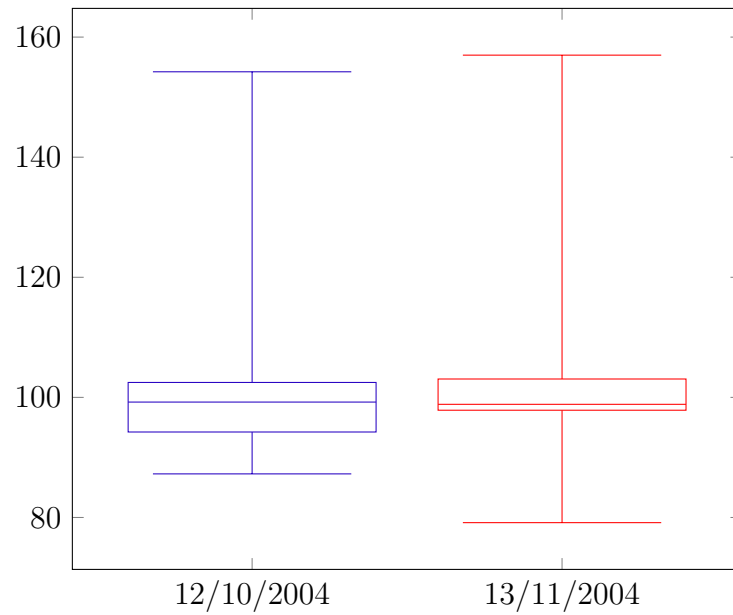


Figura 72 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

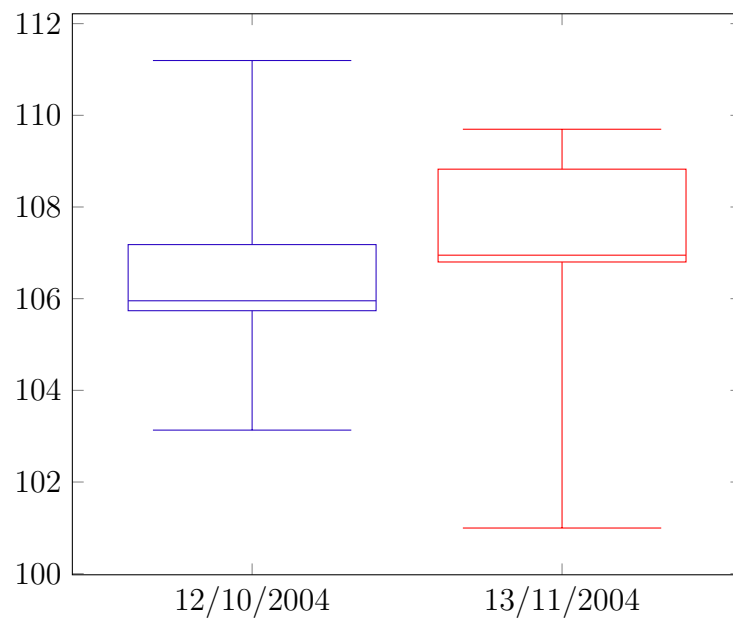


Figura 73 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor no solo para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

supracitadas.

Na Figura 73, representando os valores das amostras de solo exposto, observa-se que os valores encontrados localizam-se acima de  $100,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Com medianas equivalentes a  $105,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $106,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; para as datas de 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente.

### 5.2.1.6 Fluxo de calor sensível (H)

A estimativa do H é a etapa mais complexa dentro do algoritmo SEBAL, e foi a mais trabalhosa de ser executada através dos *scripts* implementados em LEGAL, tal valor depende de um processo iterativo que analisa a convergência numérica de duas variáveis (resistência aerodinâmica e diferença de temperatura no pixel quente), foi alcançada convergência em torno da oitava vez que o processo foi repetido, Bastiaanssen (2000); afirma que a convergência começa a ocorrer depois de cinco interações.

As Figuras 74 e 75, representam os mapas temáticos da variável H, para a região do estudo de caso, referentes aos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente.

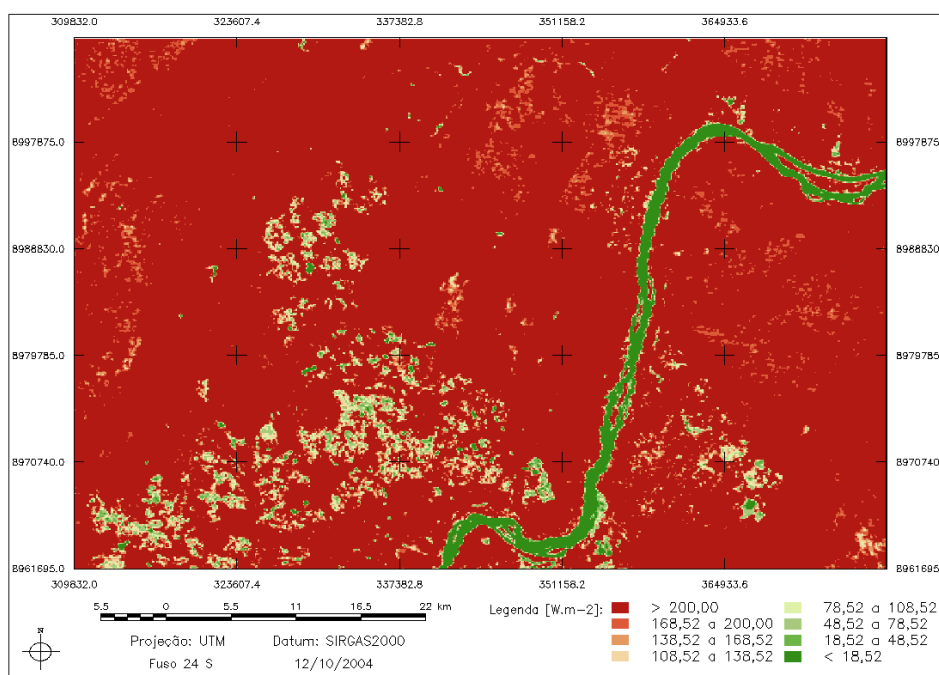


Figura 74 – Estimativa do fluxo de calor sensível para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

Para os corpos de água, os valores em sua grande maioria foram negativos, encontrados raros valores menores que  $18,52 W \cdot m^{-2}$ . Segundo Silva e Bezerra (2006), os valores menores que zero são encontrados, tendo em vista, que em corpos de água a temperatura da superfície pode ser inferior a do pixel frio. Na área de cultura irrigada, os valores observando-se os mapas, estão na faixa de  $78,52 W \cdot m^{-2}$  e  $136,52 W \cdot m^{-2}$ , valores que corroboram com os encontrado por Nicacio (2008) e Gomes (2009), que encontraram valores inferiores a  $150,0 W \cdot m^{-2}$  para cultivos em áreas irrigadas e bacia hidrográfica, respectivamente.

As áreas em vermelho no mapa representam valores superiores a  $200 W \cdot m^{-2}$ , tais valores podem estar relacionados ao período de captura das imagens utilizadas nesta pesquisa, que correspondem a um período ainda seco, onde se esta iniciando o período



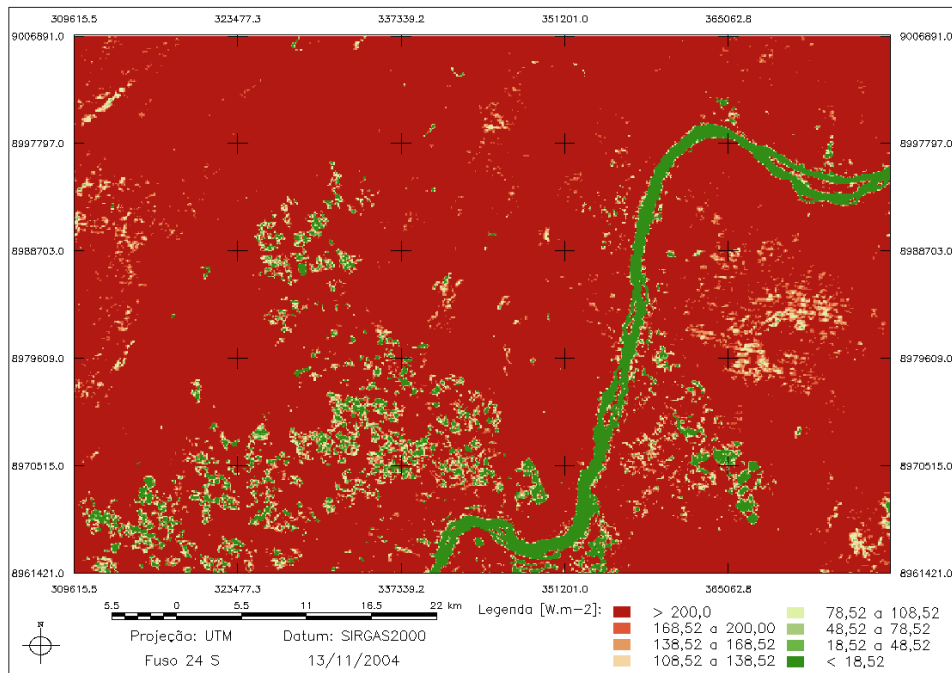


Figura 75 – Estimativa do fluxo de calor sensível para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

chuvoso, logo, os valores altos podem representar áreas com vegetação escassa ou mesmo sem vegetação.

As Figuras 76 e 77, representam as amostras de água e área irrigada, para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, observa-se que nas amostras de água, ambas obtiveram comportamentos similares, com variação interquartílicas extremamente pequenas;  $0,33 W \cdot m^{-2}$  e  $0,66 W \cdot m^{-2}$  para os respectivos dias supracitados. As duas amostras tiveram tendências de valores negativos, diferenciando somente a amostra do dia 12/10/2004 que obteve valor máximo de  $16,5 W \cdot m^{-2}$ ; tal valor pode estar vinculado a um pixel anômalo ao a alguma condição de turbidez ou banco de areia encontrado no pixel.

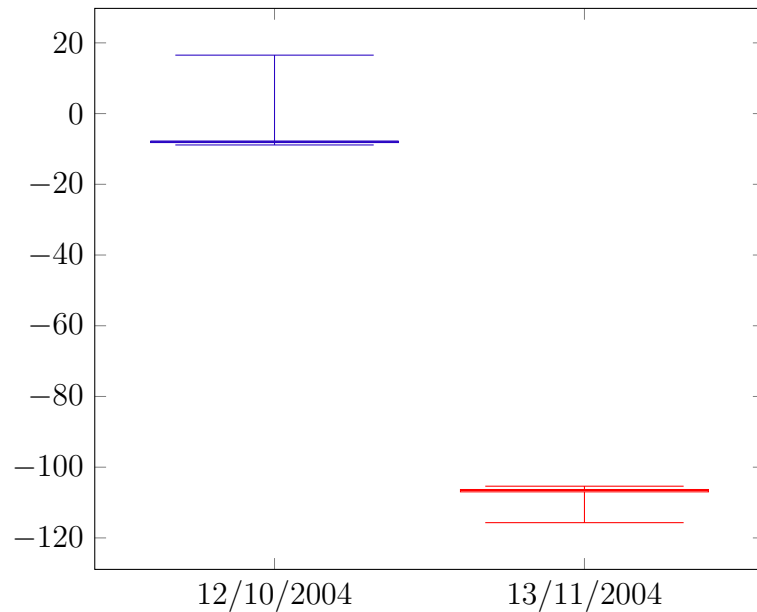


Figura 76 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

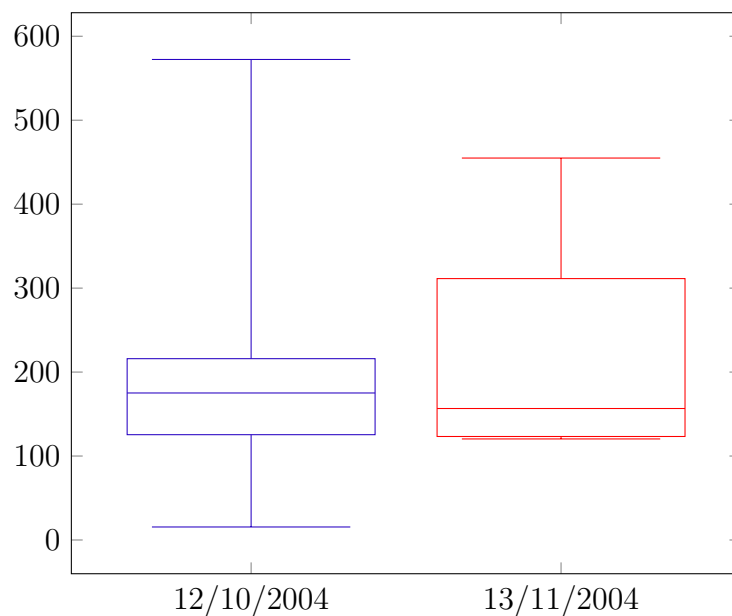


Figura 77 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 77, observa-se uma também a presença de pixel anômalo que alcançou valor máximo no dia 12/10/2004 equivalente a  $572,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; valores elevados alcançando  $454,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  também foram encontrados na imagem de 13/11/2004 e podem ser explicados pela presença de regiões de solo exposto ou pouco vegetado entre as culturas irrigadas, valores estes que acabaram se misturando a amostra de área irrigada tendo em vista a resolução espacial da imagem utilizada ser de 30 m, o que acaba misturando áreas divergentes em um mesmo pixel.

Os diagramas de caixa expressos pelas Figuras 78 e 79, apresentam as estatísticas das amostras referentes a área urbana e solo exposto para as duas datas de estudo analisadas. Em concordância com os mapas temáticos, as amostras apresentam valores altos sempre acima de  $200 W \cdot m^{-2}$ , tendo como valor máximo encontrado  $856,5 W \cdot m^{-2}$  para a amostra de solo exposto no dia 13/11/2004. A maior variação interquartílica foi encontrada na amostra de área urbana referente ao dia 12/10/2004, com valor de  $164,8 W \cdot m^{-2}$  e a menor variação foi encontrada na amostra de solo exposto, para o dia 13/11/2004, com valor de  $68,6 W \cdot m^{-2}$ .

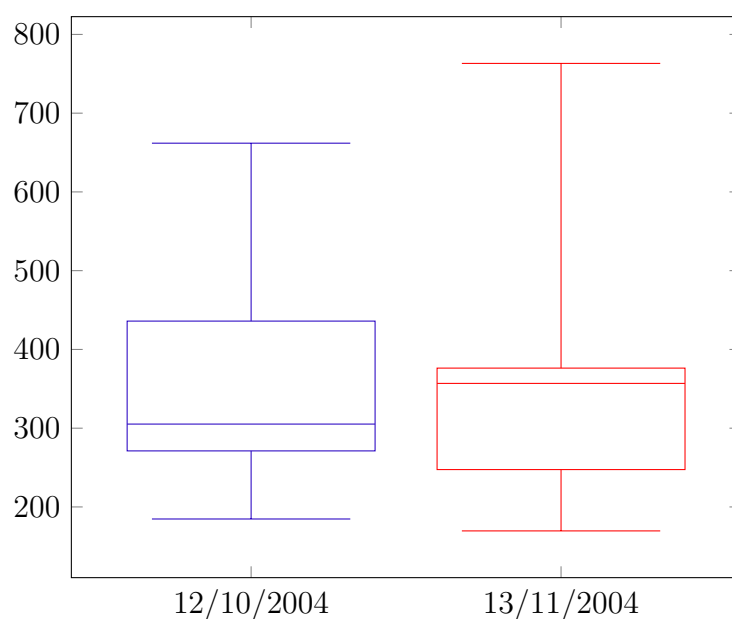


Figura 78 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

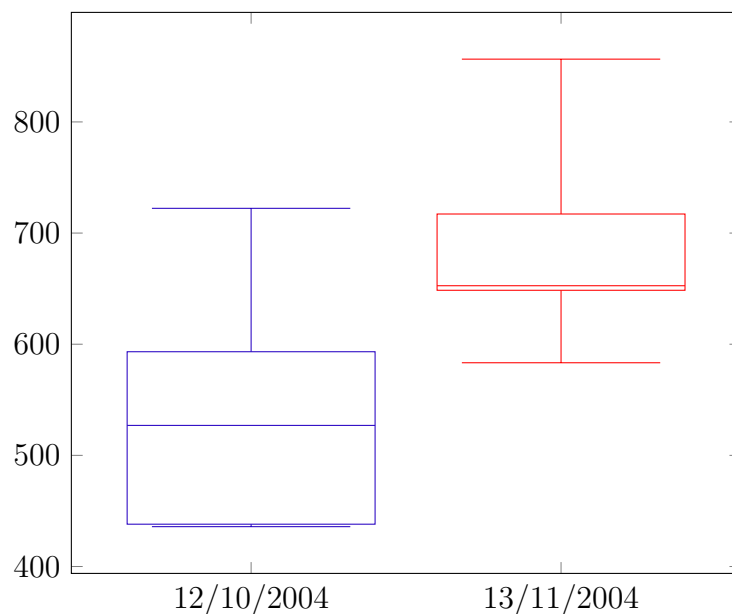


Figura 79 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor sensível para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

#### 5.2.1.7 Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente para os dias estudados podem ser vistos através das Figuras 80 e 81, que apresentam respectivamente a variação espacial do fluxo de calor latente para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Os valores mais elevados com máximas entre 517,78 e maiores que  $600 W \cdot m^{-2}$ , foram encontrados nos corpos de água, Nicacio (2008) encontrou na mesma região valores maiores que  $550,0 W \cdot m^{-2}$ , regiões com área irrigada alcançaram valores que variam entre 317,78 e  $517,78 W \cdot m^{-2}$ , valores estes condizentes com os encontrados por Nicacio (2008), que encontrou variações de 350,0 a  $550,0 W \cdot m^{-2}$ .

Observa-se que as áreas entre 217,78 e  $317,78 W \cdot m^{-2}$  (verde claro no mapa), ocupam boa parte da região estudada, tais valores correspondem a vegetação nativa, Silva e Bezerra (2006) encontrou valores em torno de  $260 W \cdot m^{-2}$  para vegetação de caatinga, o que corrobora com os valores encontrados nesta pesquisa. As áreas ocupadas por área urbana e solo exposto alcançaram os menores valores variam entre 117,78 e menores que  $17,78 W \cdot m^{-2}$ ; Nicacio (2008) encontrou valores inferiores a  $120,0 W \cdot m^{-2}$ .

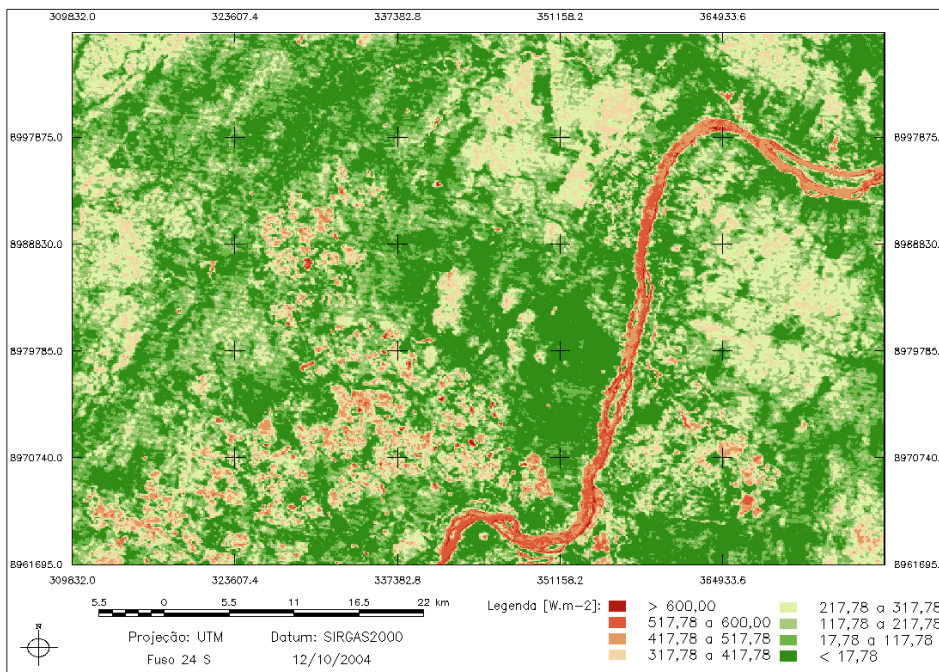


Figura 80 – Estimativa do fluxo de calor latente para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

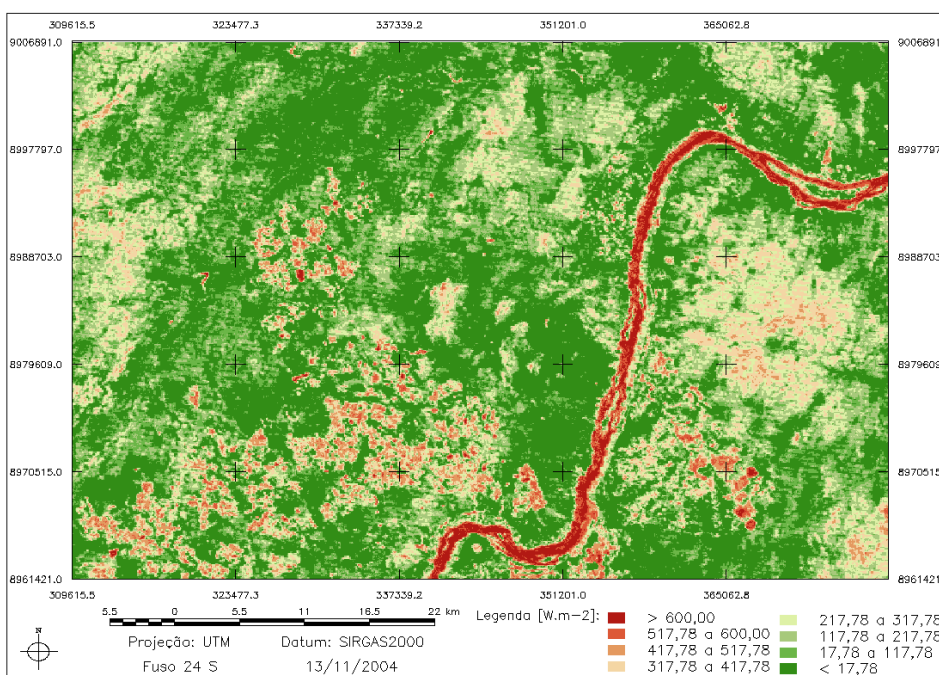


Figura 81 – Estimativa do fluxo de calor latente para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 82 apresenta o diagrama de caixa para a amostra de água nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Em consonância com os mapas temáticos, os valores encontrados para a água estão maiores que 517,78; possuindo somente um valor menor, equivalente a 455,41, referente ao dia 12/10/2004. Tal valor provavelmente ocorreu pela mistura de pixel não pertencente a classe água. Observa-se que as variações

interquartílica são pequenas o que mostra que boa parte da amostra encontra-se com valores bem próximos.

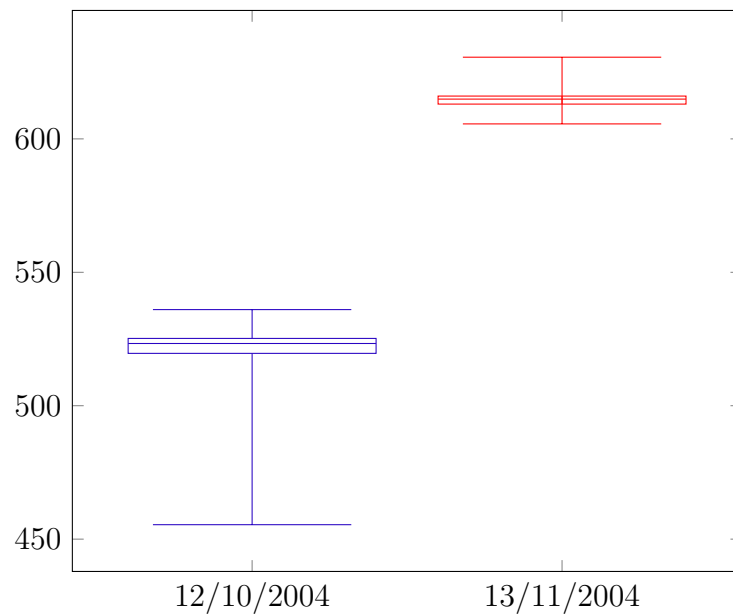


Figura 82 – Amostras de água, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

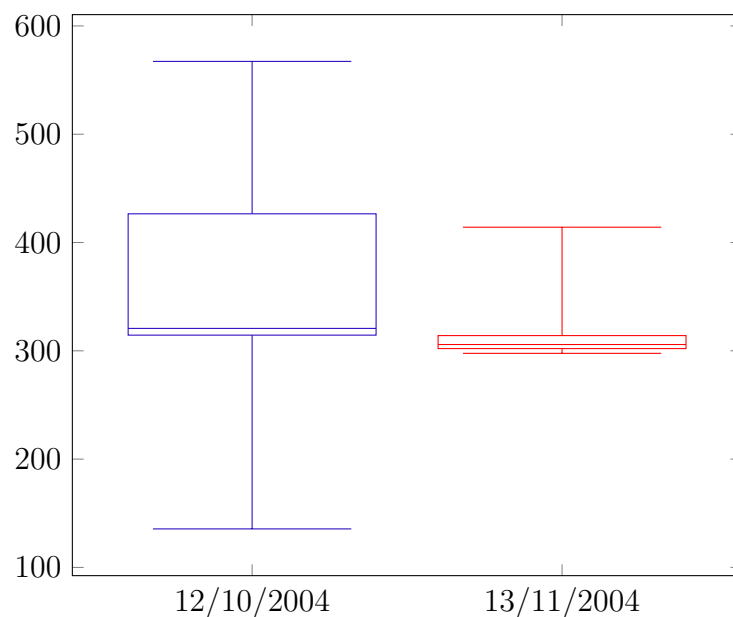


Figura 83 – Amostras de área irrigada, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 83 indica as estatística para a amostra de área irrigada nos dia 12/10/2004 e 13/11/2004, observa-se que os maiores conjuntos de dados encontram-se entre 300,0 e 400,0  $W \cdot m^{-2}$  para ambas as imagens. com médias variando entre 320,7  $W \cdot m^{-2}$  para o dia 12/10/2004 e 305,8  $W \cdot m^{-2}$  para o dia 13/11/2004 e variações interquartílicas de 112,0 e 12,0  $W \cdot m^{-2}$ ; para os mesmos dias.

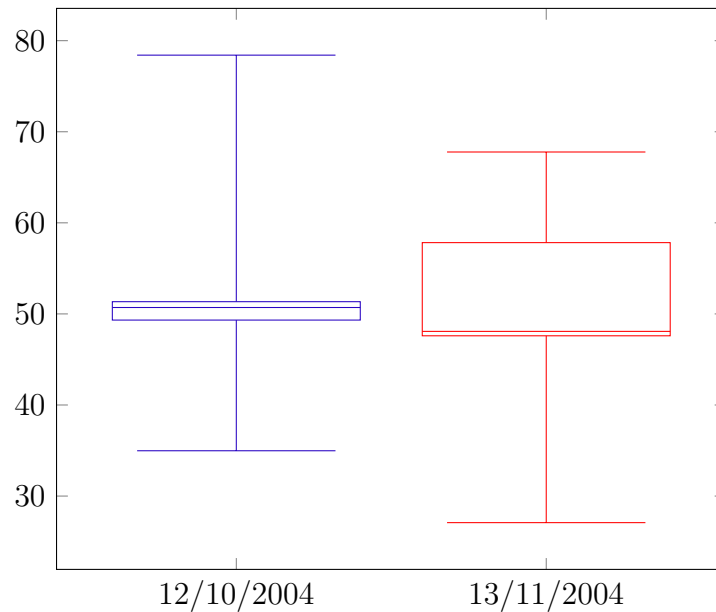


Figura 84 – Amostras de área urbana, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

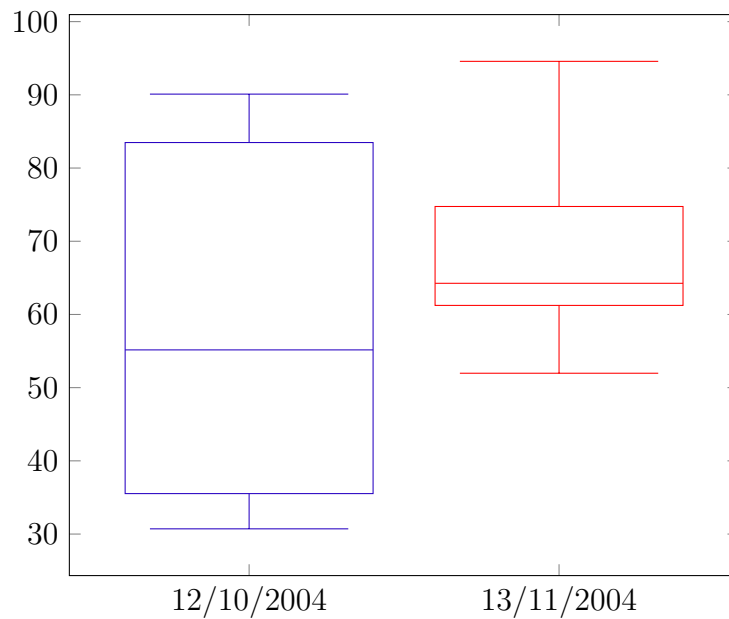


Figura 85 – Amostras de solo exposto, referentes ao fluxo de calor latente para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As Figuras 84 e 85, corroboram para os resultados já visualizados através dos mapas temáticos apresentados, a maior variação interquartílica ocorreu na amostra de solo exposto para o dia 12/10/2004, com valor de  $47,9 W \cdot m^{-2}$ . Todas as amostras obtiveram valores que se encontram entre  $30,0$  e  $90,0 W \cdot m^{-2}$ . Com alguns picos mais altos nas duas datas da amostra de solo exposto.

### 5.2.1.8 Evapotranspiração real horária

As Figuras 86 e 87, mostram os resultados alcançados com ao final da execução dos seis *scripts* implementados em LEGAL e representam a evapotranspiração real horária para as duas datas em estudo 12/10/2004 e 13/11/2004.

Os valores obtidos variam entre 0,0 e maiores que  $1,0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , valores estes condizentes com os obtidos por Meireles (2007) e coerentes com as características climáticas da área de estudo. Em áreas de cultivo irrigado, os valores tem variações superiores  $0,54 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  alcançando valores próximos a  $1,0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , valores que corroboram com os encontrados por Durand et al. (2007), que observou em um perímetro irrigado no Ceará valores para áreas irrigadas maiores que  $0,65 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Os corpos de água como já esperado são as áreas que apresentam maior evapotranspiração, alcançando valores superiores a  $1,0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , principalmente na imagem do dia 13/10/2004, tendo este dia alcançado temperaturas mais elevadas se analisada o mapa de temperatura da superfície (Figura 57).

As áreas de vegetação nativa aparecem com valores de evapotranspiração variando entre  $0,04$  a  $0,37 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . As áreas urbanas e de solo exposto aparecem com valores inferiores a  $0,04 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

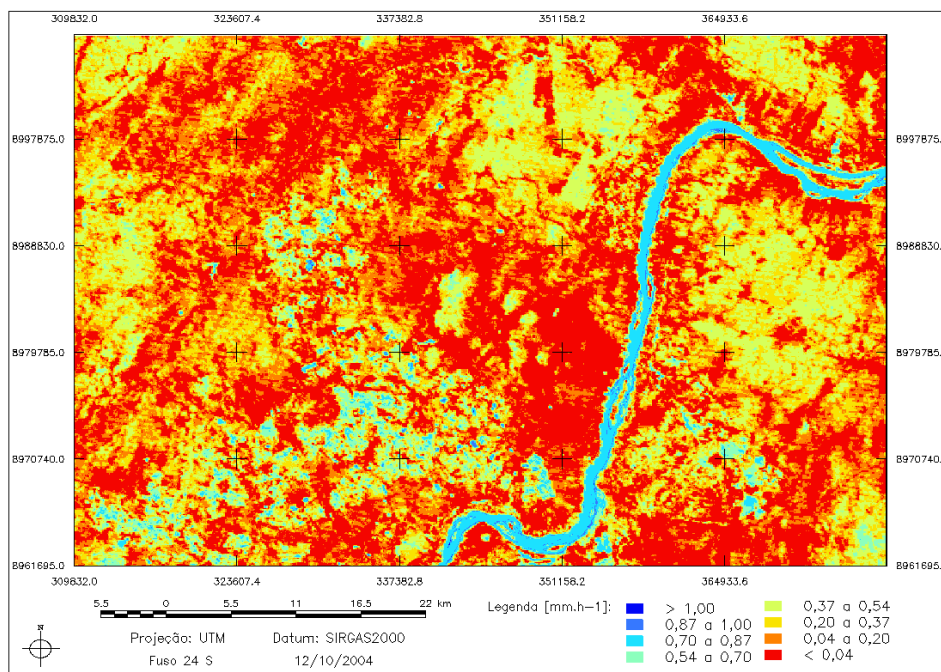


Figura 86 – Estimativa da evapotranspiração real horária para o dia 12/10/2004. Fonte: elaborado pelo autor.



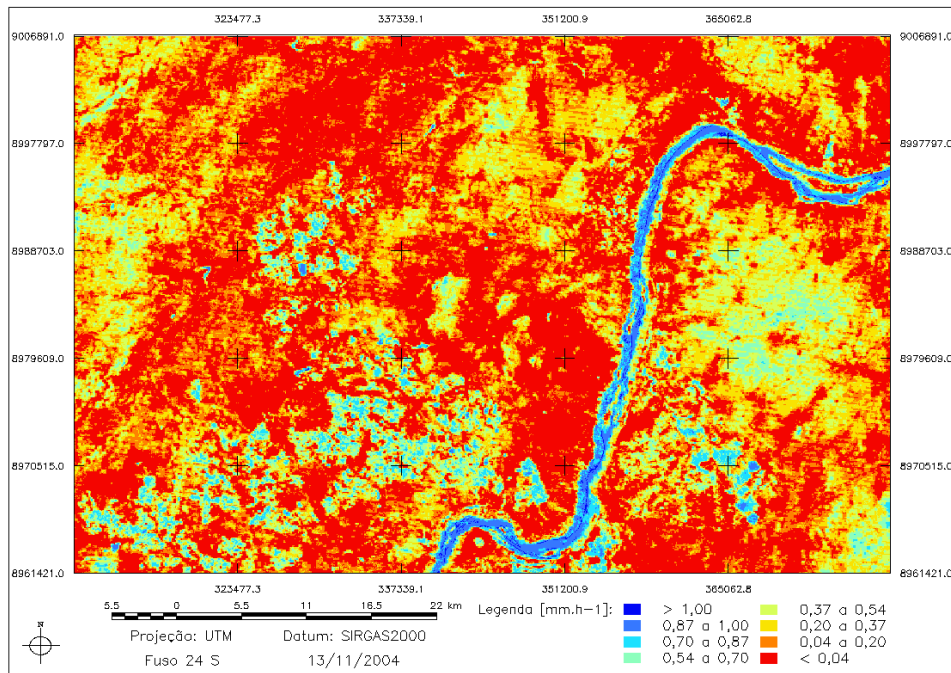


Figura 87 – Estimativa da evapotranspiração real horária para o dia 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

As estatística comprovam os valores já observados para algumas regiões da área estudada, o diagrama de caixa da Figura 88, mostra as estatística para a amostra de água pertencente aos dias 12/10/2004 e 13/11/2004. os valores encontrados estão com consonância com os mapas, mostrando valores elevados com medianas equivalentes a  $0,77$  e  $0,90 \text{ mm} \cdot h^{-1}$  para os respectivos dias supracitados. Os valores do dia 13/11/2004, como já mencionado, devido a maior temperatura da superfície obteve maiores valores de evapotranspiração na água.

A Figura 89 mostra as estatísticas para a amostra de área irrigada, observa-se que também apresentam altos valores de evapotranspiração, porém os intervalos quartílicos possuem uma concentração em valores inferiores a  $0,70 \text{ mm} \cdot h^{-1}$  e suas mediadas equivalem a  $0,46$  e  $0,57 \text{ mm} \cdot h^{-1}$  para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente.

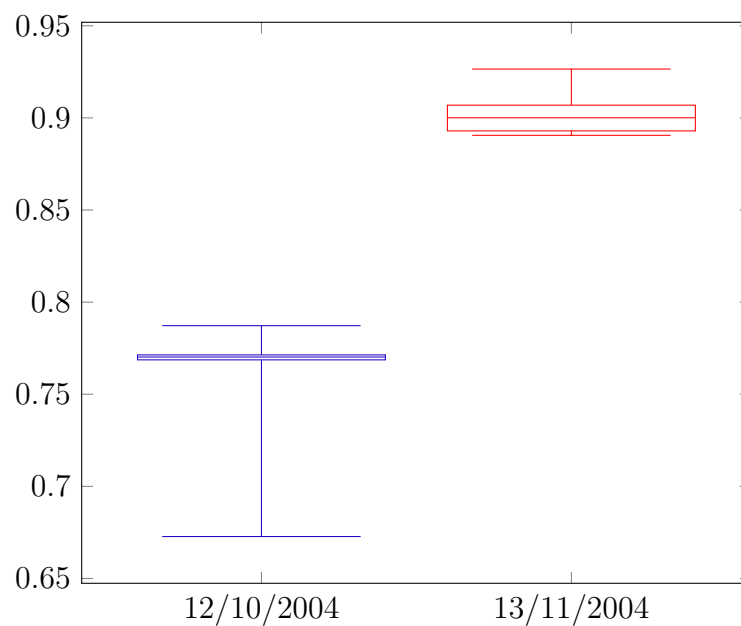


Figura 88 – Amostras de água, referentes a evapotranspiração real horária para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

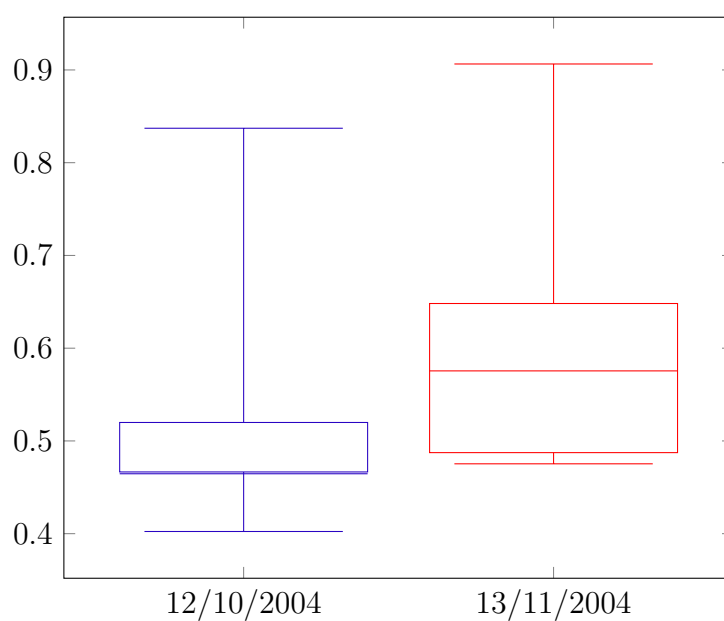


Figura 89 – Amostras de área irrigada, referentes a evapotranspiração real horária para as imagens de 12/10/2004 e 13/11/2004. Fonte: elaborado pelo autor.

## 6 CONCLUSÕES

- As imagens do LANDSAT 5, através do sensor TM, alcançam resultados espaciais refinados, mesmo se tratando de um pixel de 30 m;
- Os valores médios obtidos do saldo de radiação mais na área estudada equivalem a 573,7 e 550,8  $W \cdot m^{-2}$ , para as datas de 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente. Em corpos de água os valores foram superiores a 731,8  $W \cdot m^{-2}$ ;
- A estimativa do fluxo de calor no solo para a região de estudo de forma geral, analisando-se a média dos valores encontrados para o saldo de radiação e para o fluxo de calor no solo, para o dia 12/10/2004 a energia destinado para o aquecimento do solo alcançou em média  $\approx 18\%$  do saldo de radiação; no dia 13/11/2004 este valor foi de  $\approx 19\%$ ;
- Com relação ao fluxo de calor sensível. O percentual do saldo de radiação destinado ao aquecimento do ar, também levando em consideração a média de toda a imagem, foi de  $\approx 64\%$ , para o dia 12/10/2004 e  $\approx 69\%$  para o dia 13/11/2004. Este valores elevados ocorrem devido a ser uma região muito seca, com grandes áreas de solo exposto ou vegetação nativa esparsas ou quase inexistente;
- Para o fluxo de calor latente, na região do complexo irrigado de Petrolina/Juazeiro, analisando as médias de toda a área, verificou-se que se consumiu no dia 12/10/2004  $\approx 16\%$  do saldo de radiação para os processos evaporativos e  $\approx 12\%$  para o dia 13/11/2004, se analisar somente a área irrigada, este valores equivale a  $\approx 70\%$ . Os valores da média geral, aparecem baixos, pois existem grande área de solo exposto, onde os processos evaporativos são baixíssimos;
- A estimativa da evapotranspiração real horária através do sensor TM do LANDSAT 5 se mostrou dentro de padrões já consolidados da literatura, onde os valores encontrados ficaram na faixa de 0,00 a 1,00  $mm \cdot h^{-1}$ ;
- O *software* livre SPRING, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), rodando em no sistema operacional Ubuntu demonstrou estabilidade e melhor desempenho de processamento do que sistema proprietários;
- A escrita em lotes dos *scripts* implementados nesta pesquisa e a forma como o SPRING interpreta estes processos, agiliza o cálculo das variáveis, por consequência o processo geral;
- Diante de todo o exposto a implementação do SEBAL em LEGAL, atendeu a todas as expectativas. Quando comparado os valores encontrados nesta pesquisa com os

já consolidados na literatura, ambos estão em concordância. Além dos excelentes resultados alcançados, ainda se ganha com a valorização de um produto nacional;

## RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa, demonstram que o uso de informações advindas de sensores orbitais em conjunto com o uso de *softwares* não proprietários, alcançam resultados bastante satisfatórios. Alinhado a isto, está o uso de produtos nacionais, trazendo assim a valorização aos pesquisadores engajados no processos, assim como, a valorização da tecnologia e expertise existente no país. As imagens utilizadas do LANDSAT 5 também se mostraram bastante refinadas para as estimativas de todas as variáveis, no entanto, algumas considerações podem ser feitas.

Como recomendação para trabalhos futuros seria interessante a validação dos resultados alcançados não somente com dados já consolidados na literatura como também com valores obtidos *in situ*, assim a precisão e acurácia de todo o processo poderia ser comprovada através de valores estatísticos comparativos.

Outro ponto interessante seria a utilização da velocidade do vento obtido através de sensoriamento remoto, tal procedimento poderia aumentar a precisão dos resultados alcançados, tendo em vista que, no lugar de se utilizar somente a velocidade em um ponto sobre a estação, teria a velocidade pixel a pixel

Por fim, espera-se que o conteúdo desta pesquisa contribua para o crescimento científico da gestão de recursos hídricos através da integração com o sensoriamento remoto e os *softwares* livres.

# REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. et al. Surface energy balance algorithm for land (sebal)–advanced training and users manual. *Idaho implementation, version*, v. 1, 2002.
- ALLEN, R. G. Using the fao-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 229, n. 1, p. 27–41, 2000.
- ALLEN, R. G. et al. A landsat-based energy balance and evapotranspiration model in western us water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems*, Springer, v. 19, n. 3-4, p. 251–268, 2005.
- ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; SIQUEIRA, J. C. dos S. Avaliação espectral e geométrica das imagens rapideye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, n. 66/1, 2014.
- ARYA, P. S. *Introduction to micrometeorology*. [S.l.]: Academic press, 2001.
- AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. Prentice Hall., 1992.
- BASTIAANSSEN, W. Sebal-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin, turkey. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 229, n. 1, p. 87–100, 2000.
- BASTIAANSSEN, W. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (sebal). 1. formulation. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 212, p. 198–212, 1998a.
- BASTIAANSSEN, W. et al. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations. *Irrigation and Drainage Systems*, Springer, v. 17, n. 3, p. 141–161, 2003.
- BASTIAANSSEN, W. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (sebal).: Part 2: Validation. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 212, p. 213–229, 1998b.
- BASTIAANSSEN, W. G.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across sri lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agricultural water management*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 171–192, 2003.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. *Regionalization of surface flux desities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. [S.l.]: Landbouwniversiteit te Wageningen, 1995.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E. Manual de irrigação. *Edição, Viçosa: Editora UFV*, 2005.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications*. [S.l.]: Reidel Dordrecht, 1982.
- CABRAL, V. *Pombos de Guerra*. 2015. Disponível em: <<http://www.historiazine.com/2012/08/pombos-de-guerra.html>>. Acesso em: 29 jan 2015.

- CAMARA, G. et al. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & graphics*, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 395–403, 1996.
- CAVALCANTI, A. C. *Melhoramento de solos arenosos por adição de material argilo-mineral de alta atividade: fertilidade, movimento e retenção de água*. 106f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciência Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu., 1994.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised landsat-5 tm radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 41, n. 11, p. 2674–2677, 2003.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised landsat-5 thematic mapper radiometric calibration. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, IEEE*, v. 4, n. 3, p. 490–494, 2007.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat mss, tm, etm+, and eo-1 ali sensors. *Remote sensing of environment*, Elsevier, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.
- CODEVASF. *Perímetros Irrigados, Polos de Desenvolvimento, Juazeiro/Petrolina*. Brasília: Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2015. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/polos-de-desenvolvimento-1/juazeiro-petrolina>>. Acesso em: 22 fev 2015.
- DURAND, B. J. et al. Estimativa da evapotranspiração real utilizando o algoritmo sebal e imagens do satélite landsat 7. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, ABRH São Paulo, v. 17, 2007.
- EMBRAPA. *O Novo Mapa de Solos do Brasil*. [S.l.]: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011.
- EMBRAPA. *Dados meteorológicos*. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Semiárido, 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 24 fev 2015.
- ENGESAT. *PLEIADES 1A E 1B*. 2015. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/satelites/pleiades-1a-e-1b/>>. Acesso em: 01 fev 2015.
- FEITOSA, J. *Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat-Tm e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície*. 164f. Tese (Doutorado) — Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.
- FELGUEIRAS, C. A. A tecnologia spring, breve histórico, status atual e evolução. *1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, p. 811–824, 2006.
- FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, Soc Experiment Biol, v. 58, n. 2, p. 147–159, 2007.
- FIGUEIREDO, D. *Conceitos básicos de sensoriamento remoto*. 2005. [S.l.]: Disponível, 2010.

- FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. [S.l.]: Oficina de textos, 2002.
- FOLHES, M. *Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos*. 189 f. Tese (Doutorado) — INPE. São José dos Campos, 2007.
- GLOBALGEO. *WorldView- 2 - Especificações técnicas básicas*. 2015. Disponível em: <<http://www.globalgeo.com.br/satelite/worldview-2/>>. Acesso em: 01 fev 2015.
- GOMES, H. B. *Balancos de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais*. Tese (Doutorado) — (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande), 2009.
- GONDIM, R.; TEIXEIRA, A. d. S.; BARBOSA, F. Novo paradigma para a água e coeficientes de cultivos aplicados à gestão de recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica. *Revista Item Irrigação e Tecnologia*, n. 67, p. 14–18, 2005.
- HAFEEZ, M. et al. *Field Evapotranspiration Estimation in Central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster*. 2002. 2002 p.
- HARRISON, L. P. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. *Humidity and moisture*, Reinhold Publishing Corp., New York, NY, v. 3, p. 3–70, 1963.
- HEMAKUMARA, H.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A. F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural water management*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 109–122, 2003.
- HUETE, A. Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, Polish Academy of Sciences, Institute of Agrophysics, v. 4, n. 4, p. 367–376, 1988.
- IBGE. *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 23 fev 2015.
- IBGE. *Produto Interno Bruto dos Municípios 2012*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2012/default.shtm>>. Acesso em: 22 fev 2015.
- IBGE. *Índice de Desenvolvimento Humano 2000/2012*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 23 fev 2015.
- IBGE. *Informação Completa das Cidades*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 23 fev 2015.
- IBGE. *Projeção da População Brasileira*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 28 jan 2015.
- INPE. *A criação da DPI... como tudo começou*. 2015. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 28 jan 2015.

- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- LEIVAS, J. et al. Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do satélite aster. *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis-SC. Anais*, 2007.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. *Remote sensing and image interpretation, Hoboken*. [S.l.]: NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- MA, Z.; REDMOND, R. L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, v. 61, n. 4, p. 435–439, 1995.
- MARKHAM, B.; BARKER, J. Thematic mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. *International Journal of remote sensing*, Taylor & Francis, v. 8, n. 3, p. 517–523, 1987.
- MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. [S.l.]: Clarendon press, 1881.
- MEIRELES, M. Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo sebal e imagem landsat 5-tm na bacia do acaraú-ce. *Fortaleza, CE*, 2007.
- MELO, D. Uso de dados ikonos ii na análise urbana: testes operacionais na zona leste de são paulo. *São José dos Campos*, 2002.
- MENESES, P. R. et al. *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. [S.l.]: Universidade Federal de Brasília, 2012. 276 p.
- MOHAMED, Y.; BASTIAANSSEN, W.; SAVENIJE, H. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 289, n. 1, p. 145–164, 2004.
- NICACIO, R. M. *Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais ea metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- PACE, F. T. D. Ft estimativa do balanço de radiação à superfície terrestre utilizando imagens tm-landsat 5 e modelo de elevação digital. *Campina Grande*, v. 120, 2004.
- PERIN, A. L. Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade. 2009.
- PLANCK, M. On the law of distribution of energy in the normal spectrum. *Annalen der Physik*, v. 4, n. 553, p. 1, 1901.
- RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, v. 57, n. 4, p. 241–262, 2003.
- SABINS; LULLA, K. *Remote sensing: Principles and interpretation*. Taylor & Francis, 1987.
- SANTOS, T. V. dos; FONTANA, D. C.; ALVES, R. d. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo sebal com uso de dados do sensor aster. *Pesq. agropec. bras., Brasília*, SciELO Brasil, v. 45, n. 5, p. 488–496, 2010.



SCHOWENGERDT, R. A. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. [S.l.]: Academic Press, 1983.

SHUTTLEWORTH, W. *Evaporation. Handbook of Hydrology, DR Maidment, Ed.* [S.l.]: McGraw-Hill, 1993.

SILVA, B. B. D.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. D. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens landsat 5-tm. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 243–252, 2005.

SILVA, B. d.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens tm-landsat 5. *Revista brasileira de agrometeorologia*, v. 14, n. 2, p. 174–186, 2006.

SINGH, R. P.; ROY, S.; KOGAN, F. Vegetation and temperature condition indices from noaa avhrr data for drought monitoring over india. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 24, n. 22, p. 4393–4402, 2003.

SOVINFORMSPUTNIKE. 2015. Disponível em: <<http://www.sovinformsputnik.com/>>. Acesso em: 28 jan 2015.

TASUMI, M. *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery*. [S.l.: s.n.], 2003.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G. Satellite-based et mapping to assess variation in et with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 88, n. 1, p. 54–62, 2007.

TASUMI, M. et al. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 131, n. 1, p. 94–109, 2005.

TREZZA, R. *Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control*. [S.l.]: Utah State University, Department of Biological and Irrigation Engineering, 2002.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.

USGS. *Frequently Asked Questions about the Landsat Missions*. 2015. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acesso em: 31 jan 2015.

USGS. *Landsat 1 History*. 2015. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat1.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat1.php)>. Acesso em: 01 fev 2015.

USGS. *Landsat Missions*. 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 09 fev 2015.

VAUGHAN, R. G.; CALVIN, W. M.; TARANIK, J. V. Sebas hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 85, n. 1, p. 48–63, 2003.

---

WELIGEPOLAGE, K. *Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing*. Tese (Doutorado) — MSc Thesis, International Institute for Geo-information and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 2005.

ZYL, J. J. V. The shuttle radar topography mission (srtm): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 48, n. 5, p. 559–565, 2001.

# Apêndices

# APÊNDICE A – SCRIPT 1 - SALDO DE RADIÇÃO À FLUXO DE CALOR NO SOLO

---

```

1 //Programa LEGAL – Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico
2
3 {
4 //Declaracoes
5
6
7 MNT banda1, banda2, banda3, banda4, banda5, banda6, banda7 ("CAT_MNT");
8 MNT radiancia1, radiancia2, radiancia3, radiancia4, radiancia5, radiancia6, radiancia7 ("
  Radiancia_MNT");
9 MNT radianciabase1, radianciabase2, radianciabase3, radianciabase4, radianciabase5,
  radianciabase6, radianciabase7 ("Radianciabase_MNT");
10 MNT reflectancia1, reflectancia2, reflectancia3, reflectancia4, reflectancia5,
  reflectancia7 ("Reflectancia_MNT");
11 MNT albedotoanumerico ("AlbedoTOA_MNT");
12 MNT ndvnumerico ("NDVI_MNT");
13 MNT savinumerico ("SAVI_MNT");
14 MNT iafnumerico ("IAF_MNT");
15 MNT albedosupnumerico ("AlbedoSUP_MNT");
16 MNT epsilonNB ("Emissividade_NB");
17 MNT epsilon ("Emissividade");
18 MNT tempsuperficie ("TempSuperficie_MNT");
19 MNT tempsuperficiekelvin ("TempsupKELVIN");
20 MNT Rc ("Rc_MNT");
21 MNT RLeimitada ("RLeimitada_MNT");
22 MNT RLincidente ("RLincidente_MNT");
23 MNT RCincidente ("RCincidente_MNT");
24 MNT Rn ("Rn_MNT");
25 MNT epsilonNB1 ("EmissividadeNB_Filtro1");
26 MNT epsilon1 ("Emissividade_Filtro1");
27 MNT G ("G");
28
29
30 //Instanciacoes
31 banda1 = Recuperere (Nome = "TM1");
32 banda2 = Recuperere (Nome = "TM2");
33 banda3 = Recuperere (Nome = "TM3");
34 banda4 = Recuperere (Nome = "TM4");
35 banda5 = Recuperere (Nome = "TM5");
36 banda6 = Recuperere (Nome = "TM6");
37 banda7 = Recuperere (Nome = "TM7");
38
39 radiancia1 = Novo( Nome = "TM1_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
40 radiancia2 = Novo( Nome = "TM2_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
41 radiancia3 = Novo( Nome = "TM3_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
42 radiancia4 = Novo( Nome = "TM4_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
43 radiancia5 = Novo( Nome = "TM5_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
44 radiancia6 = Novo( Nome = "TM6_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
45 radiancia7 = Novo( Nome = "TM7_radiancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
46 radianciabase1 = Novo( Nome = "TM1_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
  50000 );

```

```
47 radianciabase2 = Novo( Nome = "TM2_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
48 radianciabase3 = Novo( Nome = "TM3_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
49 radianciabase4 = Novo( Nome = "TM4_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
50 radianciabase5 = Novo( Nome = "TM5_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
51 radianciabase6 = Novo( Nome = "TM6_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
52 radianciabase7 = Novo( Nome = "TM7_radianciabase" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
53 reflectancia1 = Novo( Nome = "TM1_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
54 reflectancia2 = Novo( Nome = "TM2_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
55 reflectancia3 = Novo( Nome = "TM3_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
56 reflectancia4 = Novo( Nome = "TM4_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
57 reflectancia5 = Novo( Nome = "TM5_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
58 reflectancia7 = Novo( Nome = "TM7_reflectancia" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
    );
59 albedotoanumerico = Novo( Nome = "AlbedoToa_numerico" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
60 ndvnumeric = Novo( Nome = "NDVI_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
61 savinumeric = Novo( Nome = "SAVI_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
62 iafricanumeric = Novo( Nome = "IAF_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
63 albedosupnumeric = Novo( Nome = "AlbedoSUP_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
64 epsilonNB = Novo( Nome = "Emissividade_NB" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
65 epsilon = Novo( Nome = "Emissividade" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
66 tempsuperficie = Novo( Nome = "Temperatura_Superficie" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
67 tempsuperficiekelvin = Novo( Nome = "TempSupKelvin" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
68 Rc = Novo( Nome = "Rc_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
69 RLemitida = Novo( Nome = "RLemitida_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
70 RLincidente = Novo( Nome = "RLincidente_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
71 RCincidente = Novo( Nome = "RCincidente_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
    50000 );
72 Rn = Novo( Nome = "Rn_numeric" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
73 epsilonNB1 = Novo( Nome = "Emissividade_NB1" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
74 epsilon1 = Novo( Nome = "Emissividade1" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
75 G = Novo( Nome = "G" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
76
77
78 // Coeficientes
79
80 Lmin1 = -1.52; // Valor a depender do ano da imagem
81 Lmin2 = -2.84; // Valor a depender do ano da imagem
82 Lmin3 = -1.17; // Valor a depender do ano da imagem
83 Lmin4 = -1.51; // Valor a depender do ano da imagem
84 Lmin5 = -0.37; // Valor a depender do ano da imagem
85 Lmin6 = 1.2378; // Valor a depender do ano da imagem
86 Lmim7 = -0.15; // Valor a depender do ano da imagem
87
88 Lmax1 = 193; // Valor a depender do ano da imagem
```

```

89 Lmax2 = 365; // Valor a depender do ano da imagem
90 Lmax3 = 264; // Valor a depender do ano da imagem
91 Lmax4 = 221; // Valor a depender do ano da imagem
92 Lmax5 = 30.2; // Valor a depender do ano da imagem
93 Lmax6 = 15.303; // Valor a depender do ano da imagem
94 Lmax7 = 16.5; // Valor a depender do ano da imagem
95
96 pi = 3.141592654;
97
98 Esun1 = 1957;
99 Esun2 = 1826;
100 Esun3 = 1554;
101 Esun4 = 1036;
102 Esun5 = 215.0;
103 Esun7 = 80.67;
104
105 anguloelevacao1 = 61.825; //Valor a depender da imagem
106 anguloelevacao2 = 61.8317; //Valor a depender da imagem
107 anguloelevacao3 = 61.8384; //Valor a depender da imagem
108 anguloelevacao4 = 61.8451; //Valor a depender da imagem
109 anguloelevacao5 = 61.8641; //Valor a depender da imagem
110 anguloelevacao7 = 61.8571; //Valor a depender da imagem
111
112 teta =((90-((anguloelevacao1+anguloelevacao2+anguloelevacao3+anguloelevacao4+
          anguloelevacao5+anguloelevacao7)/6))*pi)/180;
113
114 /*Tabela da Distancia Terra-Sol (d) em unidades astronomicas
115
116 dia      d      dia      d      dia      d      dia      d      dia      d      dia      d
117 1      0.98331  61  0.99108  121  1.00756  181  1.01665  241  1.00992  301  0.99359
118 2      0.98330  62  0.99133  122  1.00781  182  1.01667  242  1.00969  302  0.99332
119 3      0.98330  63  0.99158  123  1.00806  183  1.01668  243  1.00946  303  0.99306
120 4      0.98330  64  0.99183  124  1.00831  184  1.01670  244  1.00922  304  0.99279
121 5      0.98330  65  0.99208  125  1.00856  185  1.01670  245  1.00898  305  0.99253
122 6      0.98332  66  0.99234  126  1.00880  186  1.01670  246  1.00874  306  0.99228
123 7      0.98333  67  0.99260  127  1.00904  187  1.01670  247  1.00850  307  0.99202
124 8      0.98335  68  0.99286  128  1.00928  188  1.01669  248  1.00825  308  0.99177
125 9      0.98338  69  0.99312  129  1.00952  189  1.01668  249  1.00800  309  0.99152
126 10     0.98341  70  0.99339  130  1.00975  190  1.01666  250  1.00775  310  0.99127
127 11     0.98345  71  0.99365  131  1.00998  191  1.01664  251  1.00750  311  0.99102
128 12     0.98349  72  0.99392  132  1.01020  192  1.01661  252  1.00724  312  0.99078
129 13     0.98354  73  0.99419  133  1.01043  193  1.01658  253  1.00698  313  0.99054
130 14     0.98359  74  0.99446  134  1.01065  194  1.01655  254  1.00672  314  0.99030
131 15     0.98365  75  0.99474  135  1.01087  195  1.01650  255  1.00646  315  0.99007
132 16     0.98371  76  0.99501  136  1.01108  196  1.01646  256  1.00620  316  0.98983
133 17     0.98378  77  0.99529  137  1.01129  197  1.01641  257  1.00593  317  0.98961
134 18     0.98385  78  0.99556  138  1.01150  198  1.01635  258  1.00566  318  0.98938
135 19     0.98393  79  0.99584  139  1.01170  199  1.01629  259  1.00539  319  0.98916
136 20     0.98401  80  0.99612  140  1.01191  200  1.01623  260  1.00512  320  0.98894
137 21     0.98410  81  0.99640  141  1.01210  201  1.01616  261  1.00485  321  0.98872
138 22     0.98419  82  0.99669  142  1.01230  202  1.01609  262  1.00457  322  0.98851
139 23     0.98428  83  0.99697  143  1.01249  203  1.01601  263  1.00430  323  0.98830
140 24     0.98439  84  0.99725  144  1.01267  204  1.01592  264  1.00402  324  0.98809
141 25     0.98449  85  0.99754  145  1.01286  205  1.01584  265  1.00374  325  0.98789
142 26     0.98460  86  0.99782  146  1.01304  206  1.01575  266  1.00346  326  0.98769
143 27     0.98472  87  0.99811  147  1.01321  207  1.01565  267  1.00318  327  0.98750
144 28     0.98484  88  0.99840  148  1.01338  208  1.01555  268  1.00290  328  0.98731
145 29     0.98496  89  0.99868  149  1.01355  209  1.01544  269  1.00262  329  0.98712
146 30     0.98509  90  0.99897  150  1.01371  210  1.01533  270  1.00234  330  0.98694
147 31     0.98523  91  0.99926  151  1.01387  211  1.01522  271  1.00205  331  0.98676

```

```

148 32 0.98536 92 0.99954 152 1.01403 212 1.01510 272 1.00177 332 0.98658
149 33 0.98551 93 0.99983 153 1.01418 213 1.01497 273 1.00148 333 0.98641
150 34 0.98565 94 1.00012 154 1.01433 214 1.01485 274 1.00119 334 0.98624
151 35 0.98580 95 1.00041 155 1.01447 215 1.01471 275 1.00091 335 0.98608
152 36 0.98596 96 1.00069 156 1.01461 216 1.01458 276 1.00062 336 0.98592
153 37 0.98612 97 1.00098 157 1.01475 217 1.01444 277 1.00033 337 0.98577
154 38 0.98628 98 1.00127 158 1.01488 218 1.01429 278 1.00005 338 0.98562
155 39 0.98645 99 1.00155 159 1.01500 219 1.01414 279 0.99976 339 0.98547
156 40 0.98662 100 1.00184 160 1.01513 220 1.01399 280 0.99947 340 0.98533
157 41 0.98680 101 1.00212 161 1.01524 221 1.01383 281 0.99918 341 0.98519
158 42 0.98698 102 1.00240 162 1.01536 222 1.01367 282 0.99890 342 0.98506
159 43 0.98717 103 1.00269 163 1.01547 223 1.01351 283 0.99861 343 0.98493
160 44 0.98735 104 1.00297 164 1.01557 224 1.01334 284 0.99832 344 0.98481
161 45 0.98755 105 1.00325 165 1.01567 225 1.01317 285 0.99804 345 0.98469
162 46 0.98774 106 1.00353 166 1.01577 226 1.01299 286 0.99775 346 0.98457
163 47 0.98794 107 1.00381 167 1.01586 227 1.01281 287 0.99747 347 0.98446
164 48 0.98814 108 1.00409 168 1.01595 228 1.01263 288 0.99718 348 0.98436
165 49 0.98835 109 1.00437 169 1.01603 229 1.01244 289 0.99690 349 0.98426
166 50 0.98856 110 1.00464 170 1.01610 230 1.01225 290 0.99662 350 0.98416
167 51 0.98877 111 1.00492 171 1.01618 231 1.01205 291 0.99634 351 0.98407
168 52 0.98899 112 1.00519 172 1.01625 232 1.01186 292 0.99605 352 0.98399
169 53 0.98921 113 1.00546 173 1.01631 233 1.01165 293 0.99577 353 0.98391
170 54 0.98944 114 1.00573 174 1.01637 234 1.01145 294 0.99550 354 0.98383
171 55 0.98966 115 1.00600 175 1.01642 235 1.01124 295 0.99522 355 0.98376
172 56 0.98989 116 1.00626 176 1.01647 236 1.01103 296 0.99494 356 0.98370
173 57 0.99012 117 1.00653 177 1.01652 237 1.01081 297 0.99467 357 0.98363
174 58 0.99036 118 1.00679 178 1.01656 238 1.01060 298 0.99440 358 0.98358
175 59 0.99060 119 1.00705 179 1.01659 239 1.01037 299 0.99412 359 0.98353
176 60 0.99084 120 1.00731 180 1.01662 240 1.01015 300 0.99385 360 0.98348
177                                     361 0.98344
178                                     362 0.98340
179                                     363 0.98337
180                                     364 0.98335
181                                     365 0.98333
182                                     366 0.98331
183
184 */
185
186 d = 0.98961; //Valor a depender da data imagem
187
188
189 //Operacoes
190
191 //Radiancia
192
193 //          (Lmax - Lmin)
194 // Radiancia = ----- * ND+ Lmin , onde
195 //          255
196
197 // Lmin = Radiancia espectral correspondente ao ND minimo
198 // Lmax = Radiancia espectral correspondente ao ND maximo
199 // ND = Numero digital
200
201 radianciabase1 = (((Lmax1-(Lmin1))/255)*banda1)+(Lmin1);
202 radianciabase2 = (((Lmax2-(Lmin2))/255)*banda2)+(Lmin2);
203 radianciabase3 = (((Lmax3-(Lmin3))/255)*banda3)+(Lmin3);
204 radianciabase4 = (((Lmax4-(Lmin4))/255)*banda4)+(Lmin4);
205 radianciabase5 = (((Lmax5-(Lmin5))/255)*banda5)+(Lmin5);
206 radianciabase6 = (((Lmax6-(Lmin6))/255)*banda6)+(Lmin6);
207 radianciabase7 = (((Lmax7-(Lmin7))/255)*banda7)+(Lmin7);

```

```

208
209 radiancia1 = (radianciabase1 < 0) ? 0 : radianciabase1;
210 radiancia2 = (radianciabase2 < 0) ? 0 : radianciabase2;
211 radiancia3 = (radianciabase3 < 0) ? 0 : radianciabase3;
212 radiancia4 = (radianciabase4 < 0) ? 0 : radianciabase4;
213 radiancia5 = (radianciabase5 < 0) ? 0 : radianciabase5;
214 radiancia6 = (radianciabase6 < 0) ? 0 : radianciabase6;
215 radiancia7 = (radianciabase7 < 0) ? 0 : radianciabase7;
216
217
218 //Reflectancia
219
220 //          pi * Radiancia
221 // Reflectancia = ----- , onde
222 //          Esun * cos(teta)* d
223
224 // d = Distancia Terra-Sol em unidades astroommicas
225 // Esun = Irradicao solar media no topo da atmosfera
226 // teta = Angulo solar zenital em radianos
227
228 reflectancia1 = (pi*radiancia1)/(Esun1*(cos(teta))*d);
229 reflectancia2 = (pi*radiancia2)/(Esun2*(cos(teta))*d);
230 reflectancia3 = (pi*radiancia3)/(Esun3*(cos(teta))*d);
231 reflectancia4 = (pi*radiancia4)/(Esun4*(cos(teta))*d);
232 reflectancia5 = (pi*radiancia5)/(Esun5*(cos(teta))*d);
233 reflectancia7 = (pi*radiancia7)/(Esun7*(cos(teta))*d);
234
235 //Albedo no topo da Atmosfera (Albedo_TOA);
236
237
238 omega1 = 0.298272187;
239 omega2 = 0.269994239;
240 omega3 = 0.231488097;
241 omega4 = 0.154626227;
242 omega5 = 0.033061133;
243 omega7 = 0.012558116;
244
245 albedotoanumerico = (omega1*reflectancia1)+(omega2*reflectancia2)+(omega3*reflectancia3)
    +(omega4*reflectancia4)+(omega5*reflectancia5)+(omega7*reflectancia7);
246
247 //Albedo Superficie (Albedo_SUP);
248
249 //          aTOA(x,y) - apath _ rad
250 // asup(x,y) = -----
251 //          t^2
252
253 //t = 0.75 + 2 * 10^-5 * z
254
255 Apathrad = 0.03;
256
257 mediaaltitude = 399.97641409; //Valor a depender da area de estudo
258
259 tau = 0.75+(2*(10^-5))*mediaaltitude;
260
261 albedosupnumerico = (albedotoanumerico - Apathrad)/(tau^2);
262
263
264 //NDVI
265
266 ndvinumerico = (reflectancia4-reflectancia3)/(reflectancia4+reflectancia3);

```



```
267
268
269 //SAVI
270
271 V = 0.5;
272
273 savinumerico = (1+V)*((reflectancia4-reflectancia3)/(reflectancia4+reflectancia3+V));
274
275
276 //IAF
277
278
279 iafnumerico = (savinumerico > 0.69) ? -log(((0.69)/0.59))/0.91 : -log(((0.69-savinumerico)
    )/0.59))/0.91;
280
281
282
283 //Emissividade da Superficie
284
285 // eNB = 0.97 + 0.0033 * IAF
286
287 // e = 0.95 + 0.01 * IAF
288
289 epsilonNB1 = (iafnumerico < 3) ? 0.97 + 0.0033 * iafnumerico : 0.98;
290
291 epsilon1 = (iafnumerico < 3) ? 0.95 + 0.01 * iafnumerico : 0.98;
292
293
294 epsilonNB = (ndvnumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.99 : epsilonNB1;
295
296 epsilon = (ndvnumerico<0 && albedosupnumerico<0.47) ? 0.985 : epsilon1;
297
298
299 //Temperatura Superficie
300
301 Rp = 0;
302 tau2 = 1;
303 Rsky = 0;
304
305 Rc = ((radiancia6 - Rp)/tau2)-((1-epsilonNB)*Rsky);
306
307 //k1 = 607.76;
308 //K2 = 1260.56;
309
310 tempsuperficie = ((1260.56/(log(((epsilonNB*607.76)/Rc)+1)))- 273);
311 tempsuperficiekelvin = (1260.56/(log(((epsilonNB*607.76)/Rc)+1)));
312
313
314 //Radiacao de Onda Longa Emitida
315
316 sigma = 5.67*10^-8;
317
318 RLemitida = epsilon * sigma * (tempsuperficiekelvin^4);
319
320
321 //Radiacao de Onda Longa Incidente
322
323 temppixelfrio = 294.93798828; // Valor a depender do pixel escolhido
324
325 RLincidente = (1.08*((-log(tau))^0.265))*sigma*((temppixelfrio)^4);
```

---

```
326
327
328 //Radiacao de Onda Curta Incidente
329
330 RCincidente = 1367*cos(teta)*d*tau;
331
332
333 //Saldo de Radiacao
334
335 Rn = (1-albedosupnumerico) * RCincidente + RLincidente - RLeemitida - (1-epsilon) *
      RLincidente;
336
337 //-----
      ----- //
338 // SEGUNDA ETAPA DO SEBAL
339
340
341 //Fluxo de Calor do Solo (G)
342
343
344 G = (ndvnumerico < 0) ? 0.3*Rn : ((tempsuperficie/albedosupnumerico)*(0.0038*
      albedosupnumerico+0.0074*(albedosupnumerico^2))*(1-(0.98*(ndvnumerico^4))))*Rn;
345
346 }
```

---

# APÊNDICE B – *SCRIPT 2* - FLUXO DE CALOR SENSÍVEL (ATMOSFERA NEUTRA)

---

```

1 {
2 MNT savinumerico ("SAVI_MNT");
3 MNT tempsuperficiekelvin ("TempSupKELVIN");
4 MNT rahinicial ("Rah");
5 MNT Zomxy ("Zomxy");
6 MNT uasterisco ("U_asterisco");
7 MNT uasteriscoxy ("U_asteriscoxy");
8 MNT ucem ("U_cem");
9 MNT Zom ("Zom");
10
11
12 savinumerico = Recupere (Nome = "SAVI_numerico");
13 tempsuperficiekelvin = Recupere (Nome = "TempSupKelvin");
14 rahinicial = Novo( Nome = "RahInicial" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
15 Zomxy = Novo ( Nome = "Zomxy", ResX = 30 , ResY = 30, Escala = 50000);
16 uasterisco = Novo ( Nome = "Uasterisco", ResX = 30 , ResY = 30, Escala = 50000);
17 ucem = Novo ( Nome = "Ucem", ResX = 30 , ResY = 30, Escala = 50000);
18 Zom = Novo ( Nome = "Zom", ResX = 30 , ResY = 30, Escala = 50000);
19 uasteriscoxy = Novo ( Nome = "UasteriscoXY", ResX = 30 , ResY = 30, Escala = 50000);
20
21 //Fluxo de Calor Sensível (H)
22
23 //-----Condicoes de Atmosfera Neutra-----
24
25 //Comprimento de Rugosidade
26
27 h = 3; //Altura media da vegetacao nos arredores da estacao (m)
28
29 Zom = 0.12*h;
30
31
32 //Velocidade de friccao
33
34 ux = 2; //Velocidade do vento em uma altura Zx (Dados da Estacao)
35 Zx = 3; //Altura que foi medida a velocidade anterior (Dados da Estacao)
36 k = 0.41; //Constante de von Karman
37
38 uasterisco = (k*ux)/(log(Zx/Zom));
39
40
41 //Velocidade do vento a 100 m //verificar
42
43 ucem = (uasterisco)*((log(100/Zom)/k));
44
45 //Velocidade de friccao em todos os pixels
46
47 //Expressao proposta por Bastiaanssen
48
49 Zomxy = exp(-(5.809)+5.62*savinumerico);
50
51 uasteriscoxy = (k*ucem)/((log(100/Zomxy)));

```

---

```
52
53 //Resistencia Aerodinamica (rah)
54
55 Z1 = 0.1;
56 Z2 = 2;
57
58 rahinicial = (log(Z2/Z1))/(uasteriscoxy*k);
59
60
61 //-----Fim das Condições de Atmosfera Neutra-----
62
63 }
```

---

# APÊNDICE C – SCRIPT 3 - L MONIN IBUKHOV

---

```

1 {
2
3 MNT Rn, Rnquente ("Rn_MNT");
4 MNT G, Gquente ("G");
5 MNT dtxy ,dtquente , dtsoma , dtmedia , xyfrio , xyquente , xysoma , x2frio , x2quente , x2soma
   ("Dt");
6 MNT tempsuperficiekelvin , tempfrio , tempquente , tempsoma , tempmedia ("TempsupKELVIN");
7 MNT a, b ("Valor_regressao");
8 MNT uasteriscocorrigido , uasteriscoxy ("U_asteriscoxy");
9 MNT rahinicial , rahquente , rahcorrigido ("Rah");
10 MNT Hxy, Hquente ("H");
11 MNT Lxy ("Lxy");
12
13
14 Rn = Recupere (Nome = "Rn_numerico");
15 G = Recupere (Nome = "G");
16 uasteriscoxy = Recupere (Nome = "UasteriscoXY");
17 rahinicial = Recupere (Nome = "RahInicial");
18 tempsuperficiekelvin = Recupere (Nome = "TempSupKelvin");
19 dtquente = Novo( Nome = "dt_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
20 dtxy = Novo( Nome = "dt_xy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
21 dtsoma = Novo( Nome = "dt_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
22 dtmedia = Novo( Nome = "dt_media" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
23 xyfrio = Novo( Nome = "xy_frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
24 xyquente = Novo( Nome = "xy_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
25 xysoma = Novo( Nome = "xy_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
26 x2frio = Novo( Nome = "x2frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
27 x2quente = Novo( Nome = "x2quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
28 x2soma = Novo( Nome = "x2soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
29 a = Novo( Nome = "a" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
30 b = Novo( Nome = "b" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
31 tempfrio = Novo( Nome = "Temp_frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
32 tempquente = Novo( Nome = "Temp_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
33 tempsoma = Novo( Nome = "Temp_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
34 tempmedia = Novo( Nome = "Temp_media" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
35 rahquente = Novo( Nome = "Rah_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
36 Hquente = Novo( Nome = "H_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
37 Rnquente = Novo( Nome = "Rn_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
38 Gquente = Novo( Nome = "G_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
39 Hxy = Novo( Nome = "H_xy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
40 Lxy = Novo( Nome = "L_xy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
41 uasteriscocorrigido = Novo( Nome = "Uasterisco_Corrigido" , ResX = 30 , ResY = 30 ,
   Escala = 50000 );
42 rahcorrigido = Novo( Nome = "Rah_corrigido" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
43
44
45 //Determinar a localizacao linha/coluna do pixel quente
46 linhaquente = 881;
47 colunaquente = 1315;
48
49 //Determinar a localizacao linha/coluna do pixel frio

```

```
50 linhafria = 1315;
51 colunafria = 1911;
52
53 //Determinando e espacializando Rn do pixel quente
54
55 Rnquente = Rn.C == colunaquente && Rn.L == linhaquente ? Rn : 0;
56
57 //Determinando e espacializando G do pixel quente
58
59 Gquente = G.C == colunaquente && G.L == linhaquente ? G : 0;
60
61
62 //Fluxo de Calor Sensível do Pixel Frio (LEfrio)
63
64 Hfrio = 0;
65
66 //Fluxo de Calor Sensível do Pixel Quente (Hquente)
67
68 Hquente = Rnquente - Gquente;
69
70 //Valores para a equação linear do dt
71
72 dtfrio = 0;
73
74 //Para o dtquente e necessário a espacialização do valor de rahinicial quente
75
76 rahquente = rahinicial.C == colunaquente && rahinicial.L == linhaquente ? rahinicial : 0;
77
78 //Valores que necessitam ser escritos manualmente
79 Hquentevar = 417.25299072; //rodar a primeira vez com o valor fictício acima de 0, e
    depois de obter os valores no pixel quente substituir
80 rahquentevar = 33.32384109; //rodar a primeira vez com o valor fictício acima de 0, e
    depois de obter os valores no pixel quente substituir
81
82 p = 1.15; //densidade do ar
83 Cp = 1004; //calor específico do ar a pressão constante
84
85 dtquente = (Hquentevar * rahquentevar)/(p*Cp);
86
87 //Temperatura do pixel quente
88
89 tempquente = tempsuperficiekelvin.C == colunaquente && tempsuperficiekelvin.L ==
    linhaquente ? tempsuperficiekelvin : 0;
90
91 //Temperatura do pixel frio
92
93 tempfrio = tempsuperficiekelvin.C == colunafria && tempsuperficiekelvin.L == linhafria ?
    tempsuperficiekelvin : 0;
94
95 //valores da regressão linear
96
97 tempquentevar = 310.42758179; //rodar a primeira vez com o valor fictício acima de 0, e
    depois de obter os valores no pixel quente substituir
98 tempfrioar = 303.85604858; //rodar a primeira vez com o valor fictício acima de 0, e
    depois de obter os valores no pixel frio substituir
99
100
101 tempmedia = (tempquentevar + tempfrioar) / 2;
102
103 tempsoma = (tempquentevar + tempfrioar);
```

```
104
105 dtsoma = (dtfrio + dtquente);
106
107 dtmedia = (dtfrio + dtquente) / 2;
108
109 xyfrio = tempfrioar * dtfrio;
110
111 xyquente = tempquentevar * dtquente;
112
113 x2frio = tempfrioar^2;
114
115 x2quente = tempquentevar^2;
116
117 x2soma = (x2frio + x2quente);
118
119 b = ((2 * xyquente) - (tempsoma * dtsoma)) / ((2 * x2soma) - (tempsoma^2));
120
121 a = (dtmedia) - (b * tempmedia);
122
123 //a = -363.59954834;
124 //b = 1.21868348;
125
126 //Diferença de temperatura espacializada
127
128 dtxy = a + (b*tempsuperficiekelvin);
129
130 //Fluxo de calor sensível
131
132 Hxy = (p*Cp*dtxy)/(rahinicial);
133
134
135 //L de Monin Obukhov
136
137 k = 0.41; //constante de Von Karman
138 g = 9.81; // constante gravitacional
139
140 Lxy = -((p * Cp * (uasteriscoxy^3) * tempsuperficiekelvin) / (k * g * Hxy));
141
142 }
```

---

# APÊNDICE D – SCRIPT 4 - $R_{ah}$

## CORRIGIDO - CORREÇÃO DE INSTABILIDADE ATMOSFÉRICA

---

```

1 {
2
3 MNT uasteriscocorrigido ("U_asteriscoxy");
4 MNT ucem ("U_cem");
5 MNT rahcorrigido ("Rah");
6 MNT Lxy ("Lxy");
7 MNT x100, x2, x01 ("X");
8 MNT psi100, psi2, psi01 ("Psi");
9 MNT Zomxy ("Zomxy");
10
11 ucem = Recuperere( Nome = "Ucem" );
12 Lxy = Recuperere( Nome = "L_xy" );
13 Zomxy= Recuperere (Nome = "Zomxy" );
14 uasteriscocorrigido = Novo( Nome = "Uasterisco_corrigido" , ResX = 30 , ResY = 30 ,
    Escala = 50000 );
15 rahcorrigido = Novo( Nome = "rahcorrigido" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
16 x100 = Novo( Nome = "x100" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
17 x2 = Novo( Nome = "x2" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
18 x01 = Novo( Nome = "x01" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
19 psi100 = Novo( Nome = "psi100" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
20 psi2 = Novo( Nome = "psi2" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
21 psi01 = Novo( Nome = "psi01" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
22
23 // Correcao da estabilidade atmosferica
24
25 x100 = (1-(16*(100/Lxy)))^(0.25);
26 x2 = (1-(16*(2/Lxy)))^(0.25);
27 x01 = (1-(16*(0.1/Lxy)))^(0.25);
28
29 // Se Lxy>0 Estavel
30 // Se Lxy<0 Instavel
31 // Se Lxy=0 Neutra
32
33 psi100 = (Lxy > 0) ? -5*(100/Lxy) : (Lxy < 0) ? (2*(log(1+x100))/2) + ((log(1+(x100^2))
    /2)) - (2*(atan(x100))) + (0.5*PI) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
34 psi2 = (Lxy > 0) ? -5*(2/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x2^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
35 psi01 = (Lxy > 0) ? -5*(0.1/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x01^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
36
37 //U asterisco corrigido
38
39 k = 0.41; //Constante de von Karman
40
41 uasteriscocorrigido = (k*ucem)/((log(100/Zomxy))-(psi100));
42
43 //Resistencia aerodinamica corrigida
44
45 Z1 = 0.1;
46 Z2 = 2;

```



```
47  
48 rahcorrigido = ((log(Z2/Z1))-psi2+psi01)/(uasteriscocorrigido*k);  
49  
50  
51 }
```

---

# APÊNDICE E – *SCRIPT* 5 - PROCESSO ITERATIVO - FLUXO DE CALOR SENSÍVEL

---

```

1 {
2
3 MNT Rn, Rnquente ("Rn_MNT");
4 MNT G, Gquente ("G");
5 MNT dtxy ,dtquente , dtsoma , dtmedia , xyfrio , xyquente , xysoma , x2frio , x2quente , x2soma
  ("Interacoes");
6 MNT tempsuperficiekelvin , tempfrio , tempquente , tempsoma , tempmedia ("TempsupKELVIN");
7 MNT a, b ("Interacoes");
8 MNT uasteriscocorrigido , uasteriscoxy ("U_asteriscoxy");
9 MNT rahcorrigido ("Rah");
10 MNT rahcorrigidoquente ("Interacoes");
11 MNT Hxyfim, Hquente ("Interacoes");
12 MNT Lxy ("Interacoes");
13 MNT rahinteracao1 , rahinteracao2 , rahinteracao3 , rahinteracao4 , rahinteracao5 ,
  rahinteracao6 , rahinteracao7 , rahinteracao8 , rahinteracao9 , rahinteracao10 ("
  Interacoes");
14 MNT x100 , x2 , x01 ("Interacoes");
15 MNT psi100 , psi2 , psi01 ("Interacoes");
16 MNT ucem ("U_cem");
17 MNT Zomxy ("Zomxy");
18
19
20 Rn = Recupere (Nome = "Rn_numerico");
21 Rnquente = Recupere (Nome = "Rn_quente");
22 G = Recupere (Nome = "G");
23 Gquente = Recupere (Nome = "G_quente");
24 uasteriscoxy = Recupere (Nome = "UasteriscoXY");
25 tempsuperficiekelvin = Recupere (Nome = "TempSupKelvin");
26 ucem = Recupere( Nome = "Ucem" );
27 Zomxy= Recupere (Nome = "Zomxy" );
28 rahcorrigido = Recupere (Nome = "rahcorrigido");
29 uasteriscocorrigido = Recupere (Nome = "Uasterisco_corrigido");
30 dtquente = Novo( Nome = "dt_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
31 dtxy = Novo( Nome = "dt_xy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
32 dtsoma = Novo( Nome = "dt_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
33 dtmedia = Novo( Nome = "dt_media" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
34 xyfrio = Novo( Nome = "xy_frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
35 xyquente = Novo( Nome = "xy_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
36 xysoma = Novo( Nome = "xy_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
37 x2frio = Novo( Nome = "x2frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
38 x2quente = Novo( Nome = "x2quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
39 x2soma = Novo( Nome = "x2soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
40 a = Novo( Nome = "a" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
41 b = Novo( Nome = "b" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
42 tempfrio = Novo( Nome = "Temp_frio" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
43 tempquente = Novo( Nome = "Temp_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
44 tempsoma = Novo( Nome = "Temp_soma" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
45 tempmedia = Novo( Nome = "Temp_media" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
46 rahcorrigidoquente = Novo( Nome = "Rah_quente" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 )
  ;
47 Hxyfim = Novo( Nome = "H_xyFIM" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );

```

```

48 Lxy = Novo( Nome = "L_xy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
49 //rahinteracao1 = Novo( Nome = "Interacao1_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
50 //rahinteracao1 = Recupere( Nome = "Interacao1_Rah" );
51 //rahinteracao2 = Novo( Nome = "Interacao2_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
52 //rahinteracao2 = Recupere( Nome = "Interacao2_Rah" );
53 //rahinteracao3 = Novo( Nome = "Interacao3_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
54 //rahinteracao3 = Recupere( Nome = "Interacao3_Rah" );
55 //rahinteracao4 = Novo( Nome = "Interacao4_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
56 //rahinteracao4 = Recupere( Nome = "Interacao4_Rah" );
57 //rahinteracao5 = Novo( Nome = "Interacao5_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
58 //rahinteracao5 = Recupere( Nome = "Interacao5_Rah" );
59 //rahinteracao6 = Novo( Nome = "Interacao6_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
60 //rahinteracao6 = Recupere( Nome = "Interacao6_Rah" );
61 //rahinteracao7 = Novo( Nome = "Interacao7_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
62 rahinteracao7 = Recupere( Nome = "Interacao7_Rah" );
63 rahinteracao8 = Novo( Nome = "Interacao8_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
64 //rahinteracao8 = Recupere( Nome = "Interacao8_Rah" );
65 //rahinteracao9 = Novo( Nome = "Interacao9_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000
   );
66 //rahinteracao9 = Recupere( Nome = "Interacao9_Rah" );
67 //rahinteracao10 = Novo( Nome = "Interacao10_Rah" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala =
   50000 );
68 //rahinteracao10 = Recupere( Nome = "Interacao10_Rah" );
69 x100 = Novo( Nome = "x100" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
70 x2 = Novo( Nome = "x2" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
71 x01 = Novo( Nome = "x01" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
72 psi100 = Novo( Nome = "psi100" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
73 psi2 = Novo( Nome = "psi2" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
74 psi01 = Novo( Nome = "psi01" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
75
76
77
78 //-----Processo Iterativo-----//
79
80 //Determinar a localizacao linha/coluna do pixel quente
81 linhaquente = 881;
82 colunaquente = 1315;
83
84 //Fluxo de Calor Sensível do Pixel Frio (LEfrio)
85
86 Hfrio = 0;
87
88 //Valores para a equacao linear do dt
89
90 dtfrio = 0;
91
92 //Para o dtquente e necessario a espacializacao do valor de rahcorrigido quente
93
94 rahcorrigidoquente = rahinteracao7.C == colunaquente && rahinteracao7.L == linhaquente ?
   rahinteracao7 : 0; //Necessario alterar o nome rahcorrigido por rahinteracao(x) a
   depender do numero de interacao
95
96 //Valores que necessitam ser escritos manualmente

```

```
97
98 Hquentevar = 417.25299072; //copiar o valor do Hquentevar presente na parte 3
99 rahcorrigidoquentevar = 2.62111688; //rodar a primeira vez com o valor ficticio acima de
    0 e depois substituir pelos valores encontrado na variavel rahcorrigidoquente
100
101 p = 1.15; //densidade do ar
102 Cp = 1004; //calor especifico do ar a pressao constante
103
104 dtquente = (Hquentevar * rahcorrigidoquentevar)/(p*Cp);
105
106 //Valores que necessitam ser escritos manualmente
107
108 tempquentevar = 310.42758179; //Copiar os valores de pixel frio e quente ja colocados na
    parte 3
109 tempfrioar = 303.85604858; //Copiar os valores de pixel frio e quente ja colocados na
    parte 3
110
111 //Inicio da regressao linear
112
113 tempmedia = (tempquentevar + tempfrioar) / 2;
114
115 tempsoma = (tempquentevar + tempfrioar);
116
117 dtsoma = (dtfrio + dtquente);
118
119 dtmedia = (dtfrio + dtquente) / 2;
120
121 xyfrio = tempfrioar * dtfrio;
122
123 xyquente = tempquentevar * dtquente;
124
125 x2frio = tempfrioar^2;
126
127 x2quente = tempquentevar^2;
128
129 x2soma = x2frio+x2quente;
130
131 b = (2 * xyquente - ( tempsoma * dtsoma )) / ((2 * x2soma) - (tempsoma^2));
132
133 a = (dtmedia) - (b * tempmedia);
134
135 //a = -(597.6685);
136 //b = 1.9804;
137
138 //Diferenca de temperatura espacializada
139
140 dtxy = a + (b*tempsuperficiekelvin);
141
142 //Fluxo de calor sensivel
143
144 Hxyfim = (p*Cp*dtxy)/(rahinteracao7); //Necessario alterar o nome rahcorrigido por
    rahinteracao(x) a depender do numero de interacao
145
146
147 //L de Monin Obukhov
148
149 k = 0.41; //constante de Von Karman
150 g = 9.81; // constante gravitacional
151
152 Lxy = - ((p * Cp * (uasterisaxy^3) * tempsuperficiekelvin) / (k * g * Hxyfim));
```

```
153
154 //-----//
155 // Correcao da estabilidade atmosferica
156
157 x100 = ((1-(16*(100/Lxy))))^(0.25);
158 x2 = (1-(16*(2/Lxy)))^(0.25);
159 x01 = (1-(16*(0.1/Lxy)))^(0.25);
160
161 // Se Lxy>0 Estavel
162 // Se Lxy<0 Instavel
163 // Se Lxy=0 Neutra
164
165 psi100 = (Lxy > 0) ? -5*(100/Lxy) : (Lxy < 0) ? (2*(log(1+x100))/2) + ((log(1+(x100^2))
    /2)) - (2*(atan(x100))) + (0.5*PI) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
166 psi2 = (Lxy > 0) ? -5*(2/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x2^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
167 psi01 = (Lxy > 0) ? -5*(0.1/Lxy) : (Lxy < 0) ? 2*(log(1+(x01^2)/2)) : (Lxy==0) ? 0 : 0;
168
169 //U asterisco corrigido
170
171 k = 0.41; //Constante de von Karman
172
173 uasteriscocorrigido = (k*ucem)/(log(100/Zomxy)-psi100);
174
175 //Resistencia aerodinamica corrigida
176
177 Z1 = 0.1;
178 Z2 = 2;
179
180 rahinteracao8 = ((log(Z2/Z1))-psi2+psi01)/uasteriscocorrigido*k; //Necessario alterar o
    nome rahinteracao(x) com o numero da interacao rodada
181
182 }
```

---

# APÊNDICE F – SCRIPT 6 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL HORÁRIA

---

```

1 {
2
3 MNT Rn ("Rn_MNT");
4 MNT G ("G");
5 MNT Hxyfim ("Interacoes");
6 MNT tempsuperficiekelvin ("TempsupKELVIN");
7 MNT albedosupnumerico ("AlbedoSUP_MNT");
8 MNT lambdaET ("Fluxo_CalorLatente");
9 MNT ETh, lambdaxy ("Evapo_realHoraria");
10
11
12 Rn = Recupere ( Nome = "Rn_numerico");
13 G = Recupere ( Nome = "G");
14 Hxyfim = Recupere ( Nome = "H_xyFIM");
15 tempsuperficiekelvin = Recupere ( Nome = "TempSupKelvin");
16 albedosupnumerico = Recupere ( Nome = "AlbedoSUP_numerico");
17 lambdaET = Novo( Nome = "LambdaET" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
18 ETh = Novo( Nome = "ETh" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
19 lambdaxy = Novo( Nome = "Lambdaxy" , ResX = 30 , ResY = 30 , Escala = 50000 );
20
21 //Fluxo de Calor Latente (LambdaET)
22
23 lambdaET = Rn - G - Hxyfim;
24
25 //Evapotranspiracao Real Horaria
26
27 lambdaxy = (2.501 - (0.00236) * (tempsuperficiekelvin - (273.16)))*(10^6);
28
29 ETh = 3600 * (lambdaET/lambdaxy);
30
31 }

```

---

# Anexos

# ANEXO A – TABELA DA DISTÂNCIA TERRA-SOL

---

/*Tabela da Distancia Terra-Sol (d) em unidades astronomicas												
dia	d	dia	d	dia	d	dia	d	dia	d	dia	d	
1	0.98331	61	0.99108	121	1.00756	181	1.01665	241	1.00992	301	0.99359	
2	0.98330	62	0.99133	122	1.00781	182	1.01667	242	1.00969	302	0.99332	
3	0.98330	63	0.99158	123	1.00806	183	1.01668	243	1.00946	303	0.99306	
4	0.98330	64	0.99183	124	1.00831	184	1.01670	244	1.00922	304	0.99279	
5	0.98330	65	0.99208	125	1.00856	185	1.01670	245	1.00898	305	0.99253	
6	0.98332	66	0.99234	126	1.00880	186	1.01670	246	1.00874	306	0.99228	
7	0.98333	67	0.99260	127	1.00904	187	1.01670	247	1.00850	307	0.99202	
8	0.98335	68	0.99286	128	1.00928	188	1.01669	248	1.00825	308	0.99177	
9	0.98338	69	0.99312	129	1.00952	189	1.01668	249	1.00800	309	0.99152	
10	0.98341	70	0.99339	130	1.00975	190	1.01666	250	1.00775	310	0.99127	
11	0.98345	71	0.99365	131	1.00998	191	1.01664	251	1.00750	311	0.99102	
12	0.98349	72	0.99392	132	1.01020	192	1.01661	252	1.00724	312	0.99078	
13	0.98354	73	0.99419	133	1.01043	193	1.01658	253	1.00698	313	0.99054	
14	0.98359	74	0.99446	134	1.01065	194	1.01655	254	1.00672	314	0.99030	
15	0.98365	75	0.99474	135	1.01087	195	1.01650	255	1.00646	315	0.99007	
16	0.98371	76	0.99501	136	1.01108	196	1.01646	256	1.00620	316	0.98983	
17	0.98378	77	0.99529	137	1.01129	197	1.01641	257	1.00593	317	0.98961	
18	0.98385	78	0.99556	138	1.01150	198	1.01635	258	1.00566	318	0.98938	
19	0.98393	79	0.99584	139	1.01170	199	1.01629	259	1.00539	319	0.98916	
20	0.98401	80	0.99612	140	1.01191	200	1.01623	260	1.00512	320	0.98894	
21	0.98410	81	0.99640	141	1.01210	201	1.01616	261	1.00485	321	0.98872	
22	0.98419	82	0.99669	142	1.01230	202	1.01609	262	1.00457	322	0.98851	
23	0.98428	83	0.99697	143	1.01249	203	1.01601	263	1.00430	323	0.98830	
24	0.98439	84	0.99725	144	1.01267	204	1.01592	264	1.00402	324	0.98809	
25	0.98449	85	0.99754	145	1.01286	205	1.01584	265	1.00374	325	0.98789	
26	0.98460	86	0.99782	146	1.01304	206	1.01575	266	1.00346	326	0.98769	
27	0.98472	87	0.99811	147	1.01321	207	1.01565	267	1.00318	327	0.98750	
28	0.98484	88	0.99840	148	1.01338	208	1.01555	268	1.00290	328	0.98731	
29	0.98496	89	0.99868	149	1.01355	209	1.01544	269	1.00262	329	0.98712	
30	0.98509	90	0.99897	150	1.01371	210	1.01533	270	1.00234	330	0.98694	
31	0.98523	91	0.99926	151	1.01387	211	1.01522	271	1.00205	331	0.98676	
32	0.98536	92	0.99954	152	1.01403	212	1.01510	272	1.00177	332	0.98658	
33	0.98551	93	0.99983	153	1.01418	213	1.01497	273	1.00148	333	0.98641	
34	0.98565	94	1.00012	154	1.01433	214	1.01485	274	1.00119	334	0.98624	
35	0.98580	95	1.00041	155	1.01447	215	1.01471	275	1.00091	335	0.98608	
36	0.98596	96	1.00069	156	1.01461	216	1.01458	276	1.00062	336	0.98592	
37	0.98612	97	1.00098	157	1.01475	217	1.01444	277	1.00033	337	0.98577	
38	0.98628	98	1.00127	158	1.01488	218	1.01429	278	1.00005	338	0.98562	
39	0.98645	99	1.00155	159	1.01500	219	1.01414	279	0.99976	339	0.98547	
40	0.98662	100	1.00184	160	1.01513	220	1.01399	280	0.99947	340	0.98533	
41	0.98680	101	1.00212	161	1.01524	221	1.01383	281	0.99918	341	0.98519	
42	0.98698	102	1.00240	162	1.01536	222	1.01367	282	0.99890	342	0.98506	
43	0.98717	103	1.00269	163	1.01547	223	1.01351	283	0.99861	343	0.98493	
44	0.98735	104	1.00297	164	1.01557	224	1.01334	284	0.99832	344	0.98481	
45	0.98755	105	1.00325	165	1.01567	225	1.01317	285	0.99804	345	0.98469	
46	0.98774	106	1.00353	166	1.01577	226	1.01299	286	0.99775	346	0.98457	
47	0.98794	107	1.00381	167	1.01586	227	1.01281	287	0.99747	347	0.98446	



---

52	48	0.98814	108	1.00409	168	1.01595	228	1.01263	288	0.99718	348	0.98436
53	49	0.98835	109	1.00437	169	1.01603	229	1.01244	289	0.99690	349	0.98426
54	50	0.98856	110	1.00464	170	1.01610	230	1.01225	290	0.99662	350	0.98416
55	51	0.98877	111	1.00492	171	1.01618	231	1.01205	291	0.99634	351	0.98407
56	52	0.98899	112	1.00519	172	1.01625	232	1.01186	292	0.99605	352	0.98399
57	53	0.98921	113	1.00546	173	1.01631	233	1.01165	293	0.99577	353	0.98391
58	54	0.98944	114	1.00573	174	1.01637	234	1.01145	294	0.99550	354	0.98383
59	55	0.98966	115	1.00600	175	1.01642	235	1.01124	295	0.99522	355	0.98376
60	56	0.98989	116	1.00626	176	1.01647	236	1.01103	296	0.99494	356	0.98370
61	57	0.99012	117	1.00653	177	1.01652	237	1.01081	297	0.99467	357	0.98363
62	58	0.99036	118	1.00679	178	1.01656	238	1.01060	298	0.99440	358	0.98358
63	59	0.99060	119	1.00705	179	1.01659	239	1.01037	299	0.99412	359	0.98353
64	60	0.99084	120	1.00731	180	1.01662	240	1.01015	300	0.99385	360	0.98348
65											361	0.98344
66											362	0.98340
67											363	0.98337
68											364	0.98335
69											365	0.98333
70											366	0.98331
71	}											

---

Fonte: (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009)