

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Sob aspectos gerais, foram utilizados dados do sensor MODIS/TERRA, em cinco momentos distintos, para os anos de 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010, num recorte espacial referente à mesorregião do Sul do Estado de Goiás, região típica de cerrado localizada no centro-oeste brasileiro.

A implementação do algoritmo SEBAL consistiu no cerne da metodologia com vista à estimativa dos fluxos de energia e evapotranspiração, com base no equacionamento do balanço de energia, complementado por dados de temperatura e vento adquiridos por meio de estações meteorológicas (PCD's) instaladas na área de estudo.

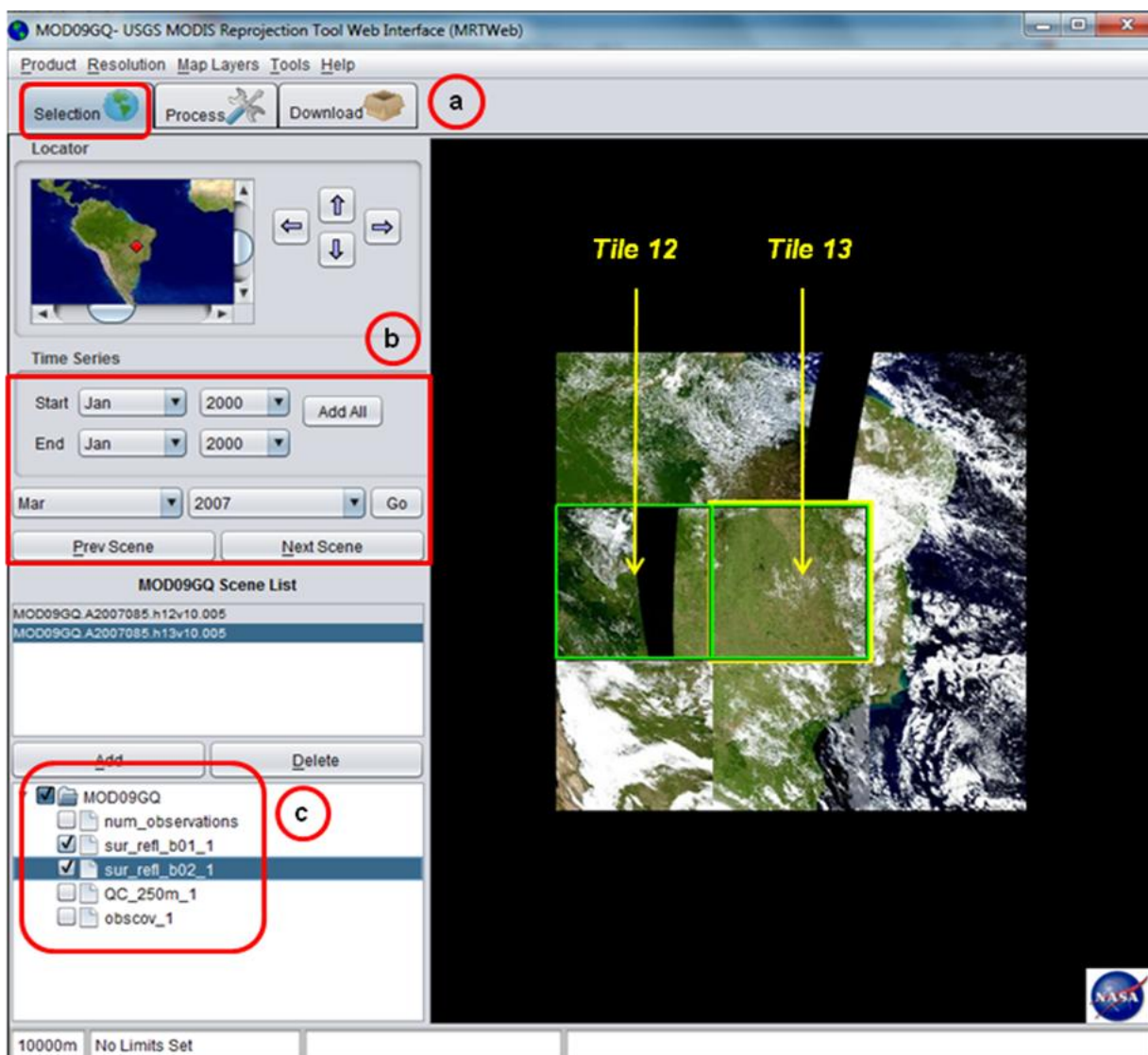
### 4.1. Aquisição dos dados e pré-processamento das imagens orbitais

Para processar os dados de Nível 0 são utilizados três pacotes softwares distintos GSFC ou DAAC; GSFC *Direct Broadcast* da NASA; IMAPP da Universidade de Wisconsin. Para os dados de Nível 1 destacam-se os aplicativos *MRTSwath* e *HDFLook*, desenvolvidos respectivamente pelo USGS (*United States Geological Survey*) e pelos *Laboratoire d'Optique Atmospherique-LOA / Université des Sciences et Technologies de Lille-USTL* da França, *University of Maryland-UMd*, EUA e o *Distributed Active Archive Center (DAAC)*, EUA, em sistema de parceria. Para o processamento dos dados de Nível 2, 3 e 4 são utilizados os aplicativos *MODIS Reprojection Tool (MRT)*, *HDFLook (Motif HDF and HDF-EOS Viewer)* e *HGE (HDF-EOS to GIS Format Conversion Tool)*. Estas ferramentas são indispensáveis para georreferenciar, reprojeter, reamostrar e converter o formato dos arquivos HDF. O aplicativo MRT está disponível para plataforma Windows, Unix (Sun, SGI) e Linux no endereço (<http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>).

#### 4.1.1. Imagens do sensor MODIS/TERRA

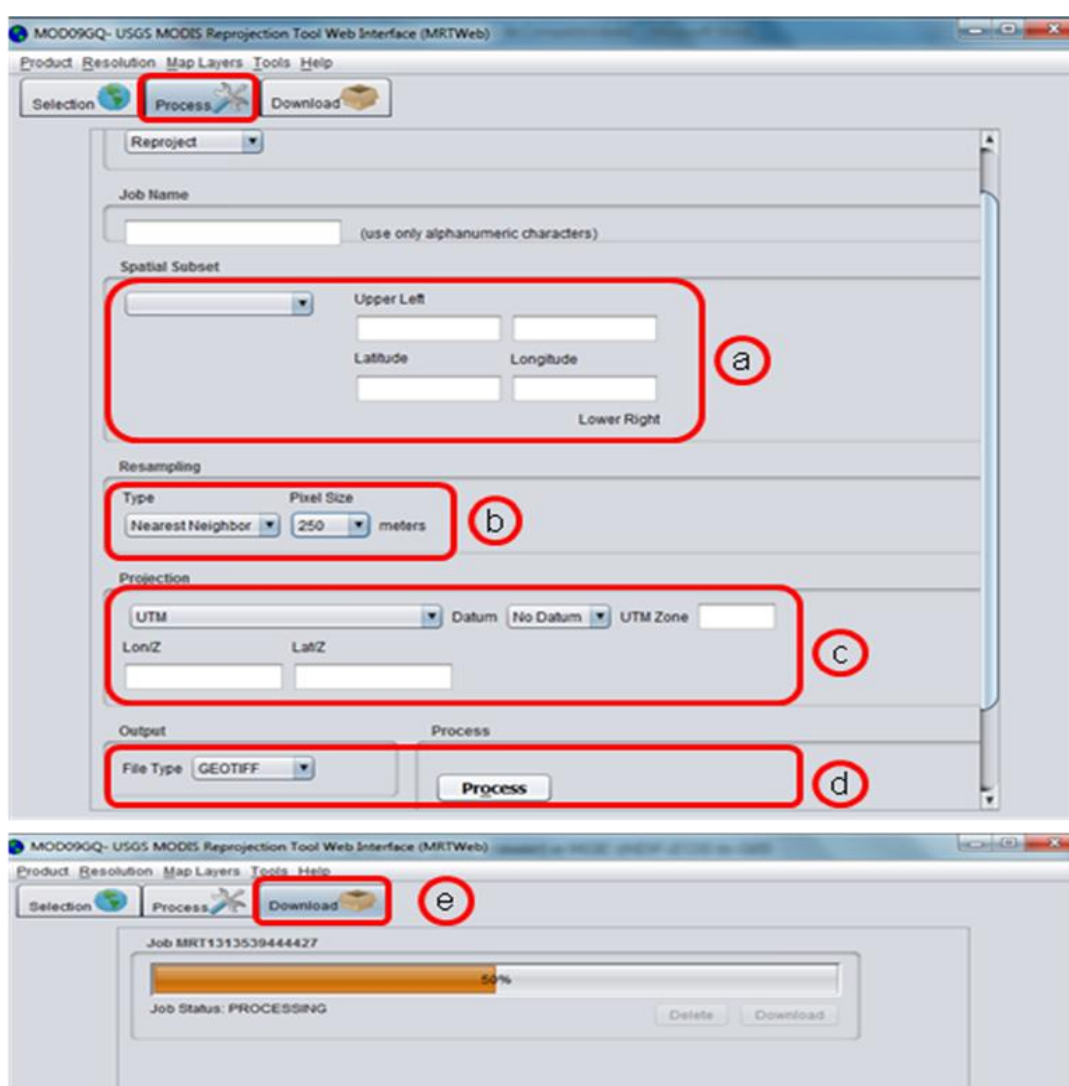
As imagens orbitais do sensor MODIS, utilizadas neste trabalho, foram adquiridas no site LPDAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) pelo sítio eletrônico <https://lpdaac.usgs.gov/>, pertencente ao Departamento Geológico

Norte-americano (USGS). Para realizar a escolha e o processamento das imagens foi utilizado o aplicativo on-line *MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb)* 4.1 disponível no site <http://mrtweb.cr.usgs.gov/> (Figura 9).



**Figura 9** - Visualização do aplicativo on-line MRTWeb 4.1 para aquisição das imagens MODIS/TERRA. (a) abas referentes às três etapas para aquisição das imagens MODIS/TERRA; (b) seleção das imagens segundo o recorte temporal (ano, mês e dia); (c) escolha das bandas a serem processadas.

Este aplicativo tem a capacidade de reprojeter os dados da projeção ISIN (*Integerized Sinusoidal*) ou Sinusoidal (SIN) para outras projeções, tais como, Geográfica, Lambert, Cilíndrica, Mercator, além da opção de inserção dos parâmetros de um *datum* qualquer. O *MRTWeb 4.1* também recorta a imagem, realiza mosaicos de *tiles*, reamostra a resolução espacial das imagens com a opção de três interpoladores (vizinho mais próximo, bilinear e convolução cúbica), e converte o formato HDF para GeoTIFF, HDF ou RAW, como pode ser visto na Figura 10.



**Figura 10** - Etapas de processamento e download das imagens MODIS/TERRA pelo aplicativo *MRTWeb 4.1*. (a) recorte da imagem por retângulo envolvente; (b) reamostragem das imagens; (c) escolha do sistema de projeção; (d) escolha do formato de saída e etapa do download.

O *MRTWeb 4.1* é um aplicativo similar ao *MRT Tools*, apresentando a vantagem de poder realizar a pré-visualização, escolha e processamento em um único aplicativo. Entretanto, não há a possibilidade de utilizar o software através de linhas de comandos, com *scripts* ou arquivos de lote (conjunto de comandos ordenados) como é possível no *MRT Tools*.

Todas as imagens foram adquiridas no formato GeoTiff, com sistema de projeção UTM e *datum* de referencia WGS84. Após uma breve pré-visualização, foi realizada a seleção daquelas que apresentaram melhor cobertura do recorte espacial (área de estudo) e temporal delimitado para este estudo. Foram utilizadas imagens dos sensores MODIS/Terra entre o período de janeiro a abril, dos anos de 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. Para cobrir toda a área de estudo, foram utilizadas duas imagens para cada data, referentes aos *tiles* h12 V10 e h13 V10, que por sua vez, foram mosaicadas através do próprio aplicativo *MRTWEB 4.1*, antes de ser realizado o download de cada banda das mesmas.

Para a escolha das imagens MODIS/Terra foram adotados os seguintes critérios listados abaixo:

- Período de colheita da cana-de-açúcar e soja (entre os meses de dezembro e abril).
- De acordo com o período de maior Índice de Área Foliar (IAF) (período de colheita da cana e soja).
- Menor cobertura de nuvens sobre a área de estudo (inferior a 5%, pelo menos).

Na Tabela 1, estão relacionadas às imagens MODIS/Terra adquiridas para implementação do algoritmo SEBAL.

**Tabela 1** - Dados orbitais do sensor MODIS/TERRA adquiridas para implementação no algoritmo SEBAL.

<b>Data</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Produtos / Bandas</b>
10/04/2005	100/2005	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)
24/04/2006	114/2006	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)
26/03/2007	85/2007	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)
25/04/2008	116/2008	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)
19/04/2009	109/2009	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)
10/04/2010	100/2010	MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) MOD09GQ (bandas1 e 2) MOD11A1 (LST)

Os produtos MOD09 da coleção 5 é composto por sete bandas de refletância de superfície que provém da plataforma MODIS calculadas a partir do nível MODIS/TERRA 1B. Estão divididas em duas bandas com 250m de resolução espacial (produto MOD09GA) e 7 bandas com resolução espacial de 500m (produto MOD09GQ). Este produto apresenta uma estimativa da refletância de superfície, medida ao nível do solo sem dispersão atmosférica ou absorção, com correção dos efeitos dos gases atmosféricos e aerossóis. Os comprimentos de ondas variam nas bandas 1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm), 3 (459 479), 4 (545-565 nm), 5 (1230-1250 nm), 6 (1628-1652 nm) e 7 (2105-2155 nm) (VERMOTE; KOTCHENOVA; RAY, 2011).

Na Tabela 2 estão relacionadas algumas características técnicas das bandas MODIS/Terra utilizadas neste trabalho. O produto MOD09 (refletância de superfície) é utilizado como dado de entrada para obtenção de diversos outros produtos da superfície terrestre, tais como: BRDF/albedo, FPAR/LAI e índices de vegetação. Para garantir a integridade dos dados do produto MOD09, as estimativas da refletância da superfície vêm acompanhadas do controle de qualidade (*Quality Assessment*, QA), com as seguintes informações sobre cada pixel (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007):

- Integridade da estimativa da refletância da superfície;
- Sucesso da conclusão do esquema de correção;
- Presença de nuvens (claro, nublado, parcialmente nublado, fechado);
- Presença de nuvens Cirrus (sem Cirrus, baixa, média e alta);
- Fonte de informações de aerossóis (climatologia);
- Presença de aerossol (baixo, médio e alto);
- Fonte de informação de vapor d'água (climatologia);
- Fonte de informação de ozônio (climatologia);
- Se o pixel é terra ou água.

**Tabela 2** - Especificações técnicas dos produtos MODIS/TERRA, tais como faixa do espectro coberta, resolução espacial, aspectos de armazenamento dos dados e fator de escala correção.

Fonte: Rudorff, Shimabukuro e Ceballos (2007).

<b>Produto</b>	<b>Bandas</b>	<b>Resolução</b>	<b>Tipo de dados</b>	<b>Ranger válido</b>	<b>Fator de escala</b>
MOD09GQ	Supefície de Reflectância Banda 1 (620 - 670 nm)	250 m	16-bit signed	100 - 16000	0.0001
MOD09GQ	Supefície de Reflectância Banda 2 (841-876 nm)	250 m	16-bit signed	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 1 (620 - 670 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 2 (841-876 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 3 (459-479 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 4 (545-565 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 5 (1230-1250 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 6 (1628-1652 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD09GA	Supefície de Reflectância Banda 7 (2105-2155 nm)	500 m	16-bit signed integer	100 - 16000	0.0001
MOD11A1	Temperatura de superfície (LST)	1 km	16-bit unsigned integer	100 - 16000	0.02

#### 4.1.1.1. Produto MOD09GQ

Os produtos MOD09GQ MODIS Terra/Aqua superfície de refletância global diária são disponibilizados em duas bandas de 250m de resolução espacial. A banda 1 é referente ao vermelho e a banda 2 corresponde ao infravermelho próximo em escala de cinza. Este produto geralmente é utilizado em conjunto com os produtos MOD09GA para melhorar a qualidade e as informações, conferindo ganhos principalmente para estudos com vegetação e água (VERMOTE; KOTCHENOVA; RAY, 2011).

#### 4.1.1.2. Produto MOD09GA

Os produtos MOD09GA MODIS TERRA/AQUA superfície de refletância global diária 500 m e 1 km de resolução espacial. Estes produtos são fornecidos através de 7 bandas de refletância de superfície com 500m ou 1km de resolução espacial (VERMOTE; KOTCHENOVA; RAY, 2011).

#### 4.1.1.3. Produto MOD11A1

O produto MOD11 contém a temperatura da superfície da Terra (*LST – Land Surface Temperature*) e a emissividade, que são variáveis-chaves para descrever processos da superfície terrestre, sendo necessários para diversos estudos climatológicos, hidrológicos, ecológicos e biológicos. Esta variável utiliza os dados dos Níveis 2 e 3 com o algoritmo LST “ na resolução espacial de 1 km, e a emissividade recuperada dos dados a bordo da plataforma AQUA com resolução espacial de 5 km, em condições atmosféricas de céu limpo (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007).

#### 4.1.2. Levantamento dos dados climatológicos

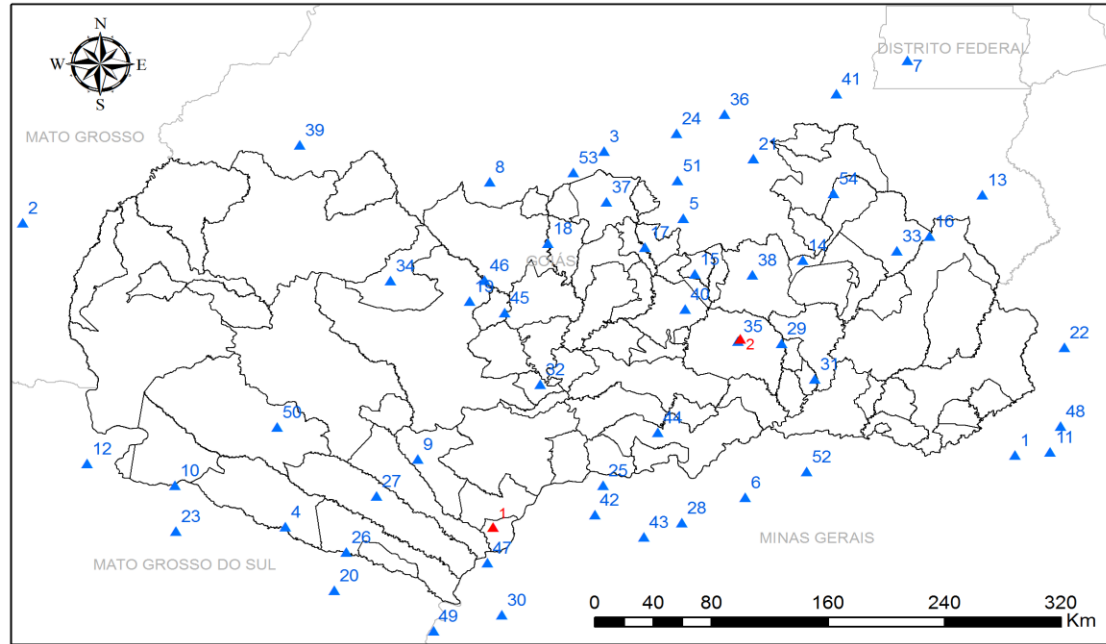
Os dados necessários para realizar a implementação do algoritmo SEBAL consistem em: velocidade do vento, medida a altura de 2 ou 10 metros acima do solo, e temperatura. São dados obtidos geralmente por meio de estações meteorológicas (PCD's), estações agrometeorológicas ou estações



micrometeorológicas. Para tanto, faz-se necessário apenas uma única destas estações instalada na região de estudo, onde se pretende realizar a estimativa da evapotranspiração por meio do algoritmo SEBAL. Estes valores, junto aos produtos oriundos dos sensores remotos, serão estimados para o pixel onde se encontra a estação, e extrapolados para toda a área de cobertura da imagem orbital, sendo obtida grande confiabilidade dos valores estimados.

A partir da delimitação da área de estudo foi realizado o levantamento das estações disponíveis que poderiam fornecer os dados climatológicos, para fins de espacialização dos índices pluviométricos e de temperatura, e implementação do SEBAL. Foram utilizadas 24 estações pluviométricas da ANA, na mesorregião do Sul Goiano e mais 29 próximas dela, localizadas nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, e também as estações meteorológicas de São Simão e Morrinhos, concedida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A distribuição das estações pela área de estudo podem ser visualizadas no mapa da Figura 11.

## Estações Pluviométricas e Meteorológicas



### Legenda

- ▲ Estações do INMET
- ▲ Estações da ANA
- Mesorregião do Sul Goiano
- Estados do Brasil

Fonte

Agência Nacional de Águas (ANA)  
Sistema HidroWeb  
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)  
SIEG/SEPLAN - GO

### Estações Pluviométricas da ANA

Nº	Codigo	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	1847003	ABADIA DOS DOURADOS	-18,4911	-47,4064	784
2	1653004	ALTO GARÇAS	-16,9442	-53,5336	564
3	1649000	ANICUNS	-16,4853	-49,9428	605
4	1852000	APORÉ	-18,9667	-51,91	533
5	1649001	ARAGOÁNIA	-16,9119	-49,4522	800
6	1849006	AVANTIGUARA	-18,7719	-49,0697	0
7	1547024	BRASILIA SUL - SE	-15,8606	-48,0689	0
8	1650000	CACHEIRA DE GOIAS	-16,6994	-50,6492	766
9	1951001	CAMPO ALEGRE	-18,5178	-51,0931	670
10	1852003	CIDADE CHAPADÃO GAUCHO	-18,6917	-52,5939	721
11	1847008	COROMANDEL	-18,4711	-47,1883	820
12	1853004	COSTA RICA	-18,5472	-53,1353	635
13	1647002	CRISTALINA	-16,7564	-47,6061	1239
14	1748000	CRISTIANÓPOLIS	-17,1919	-48,7144	703
15	1749009	CROMÍNIA	-17,2847	-49,3828	0
16	1747007	ENGENHEIRO AMORIM	-17,0333	-47,9333	0
17	1749001	FAZENDA BOA VISTA	-17,1056	-49,6908	558
18	1750001	FAZENDA NOVA DO TURVO	-17,0792	-50,2894	509
19	1750008	FAZENDA PARAÍSO	-17,4658	-50,7742	680
20	1951003	FAZENDA PINDORAMA	-19,3908	-51,6089	458
21	1649004	GOIANÓPOLIS	-16,5164	-49,0203	900
22	1747005	GUARDA-MOR	-17,7725	-47,0986	1000
23	1852002	INDAIA GRANDE	-18,9967	-52,5872	600
24	1649006	INHUMAS	-16,3467	-49,495	747
25	1849002	IPAÇU	-18,6919	-49,9486	0
26	1951001	ITAJÁ	-19,1364	-51,5344	436
27	1851002	ITARUMÁ	-18,7647	-51,3472	424
28	1849000	ITUJUBA	-18,9411	-49,4631	563
29	1748017	JUSANTE PONTE GO-213	-17,7478	-48,8444	0
30	1950018	LIMEIRA DO OESTE	-19,5547	-50,5731	0
31	1748004	MARZAGÃO	-17,9828	-48,6414	605
32	1850003	MAURILÂNDIA	-18,0186	-50,3372	500
33	1748005	MONTES CLAROS	-17,1297	-48,1333	602
34	1751004	MONTIVÍDIU	-17,3283	-51,2608	0
35	1749003	MORRINHOS	-17,7328	-49,1153	792
36	1649009	OURO VERDE DE GOIAS	-16,2186	-49,1978	1078
37	1649010	PALMEIRAS DE GOIAS	-16,8031	-49,9286	500
38	1749005	PIRACANJUBA	-17,2894	-49,0272	776
39	1651002	PIRANHAS	-16,4233	-51,8228	356
40	1749004	PONTALINA	-17,5169	-49,4417	500
41	1648001	PONTE ANAPOLIS - BRASILIA	-16,0833	-48,5083	0
42	1849026	PONTE BR-365 (FAZ. BOA VISTA)	-18,8869	-50,0003	450
43	1849006	PONTE DO PRATA	-19,0353	-49,6967	450
44	1849016	PONTE MEIA PONTE	-18,3389	-49,6108	500
45	1750003	PONTE RIO VERDEÃO	-17,5414	-50,5561	500
46	1750004	PONTE RODAGEM	-17,3253	-50,6819	0
47	1950011	PONTE SÃO DOMINGOS	-19,2081	-50,6628	390
48	1847011	PONTE VICENTE GÓULART-JUSANTE	-18,2983	-47,1219	742
49	1950017	PORTO ALENCASTRO	-19,6617	-50,9964	0
50	1851005	SERRANÓPOLIS	-18,3044	-51,9622	690
51	1649012	TRINDADE	-16,6611	-49,4878	777
52	1848006	TUPACIGUARA	-18,6008	-48,6908	0
53	1650003	TURVÂNIA	-16,6094	-50,1328	700
54	1648002	VIANÓPOLIS	-16,7464	-48,5247	893

### Estações Meteorológicas do INMET

Nº	Codigo	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	A011	SÃO SIMÃO	-18,9697	-50,6289	488,51
2	A003	MORRINHOS	-17,7166	-49,1	771,42

**Figura 11** - Distribuição das estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas para levantamento dos dados de chuvas para os quinze dias anteriores a cada imagem MODIS/TERRA processadas pelo algoritmo SEBAL.

Fonte: ANA/Hidroweb, INMET e SIEG/SEPLAN – GO.

Os critérios de escolha das estações pluviométricas e meteorológicas obedeceram às integridades dos dados e a sua localização nas proximidades da área de estudo, de maneira que houvesse boa cobertura geográfica.

A partir dos dados das 54 estações pluviométricas da ANA foram elaboradas cinco planilhas Excel contendo os dados de chuvas diários, referentes ao período de quinze dias anteriores às datas de cada imagem do sensor MODIS/TERRA. Na Tabela 3 estão relacionados às datas das imagens orbitais utilizadas e o período de chuvas coletados nas estações para elaboração do MNT contendo as médias diárias de chuvas das estações, de forma espacializada.

**Tabela 3** - Período de seleção dos dados pluviométricos referentes aos 15 dias anteriores às imagens selecionadas.

<b>Datas</b>	<b>Período coletado</b>
24 de abril de 2006	10 de abril até 24 de abril
26 de março de 2007	12 de março até 26 de março
25 de abril de 2008	11 de abril a 25 de abril
19 de abril de 2009	05 de abril até 19 de abril
10 de abril de 2010	27 de março até 10 de abril

A partir da elaboração das planilhas e do cálculo das médias de chuvas, foi utilizado o interpolador *Spline* no software ArcGis 10, para criar um MNT que representasse as médias das chuvas, de forma espacializada, para toda a área da mesorregião do Sul Goiano. O interpolador *Spline* cria uma superfície suavizada para as relações existentes entre os pontos amostrais, estimando valores desconhecido através de pontos, cujos valores sejam conhecidos para o fenômeno que se quer modelar. A aplicação de um interpolador, parte da suposição de que pontos mais próximos uns dos outros apresentem valores parecidos que aqueles distantes. Também foram criados gráficos para mostrar a distribuição das médias de chuvas para cada estação fornecendo uma melhor visualização com os dados produzidos pelos dados interpolados pelo método *Spline* no software ArcGis 10.

#### 4.1.3. Arquivos vetoriais

Os arquivos vetoriais utilizados neste trabalho foram adquiridos no sítio eletrônico do Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás (SIEG/SEPLAN-GO), acessível pelo endereço <http://www.sieg.go.gov.br/>. O Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás integra diversos órgãos de Administração Pública Estadual, tais como, SEGPLAN, SIC/SGM, AGETOP, SEAGRO, SECTEC, SANEAGO, SEMARH, SEFAZ, CELG, Pol. Técnico-Científica e o Ministério Público, com o objetivo de aperfeiçoar as informações do Estado de Goiás referentes às áreas de estatística e geoprocessamento, para ser disponibilizada a toda sociedade.

O SIEG consiste num sistema de informações geográficas on-line, com um banco de dados formado por dados georeferenciados que geram arquivos nos formatos *raster*, *shapefile*, *dbf*, *KMZ* (Google) e *gif* para download, além de disponibilizar uma interface na versão *MapServer* e *I3Geo* para realizar composições de mapas que podem ser enviados para impressão. Disponibilizam estatísticas estaduais e municipais, bem como publicações realizadas com estes recursos informativos acima relatados. Diversos mapas, referentes à geologia, geomorfologia, carta de declividade, hipsometria, mapas cadastrais, regiões de planejamento, carta imagem, recursos hídricos (bacias hidrográfica), mapa político rodoviário, uso e cobertura do solo, dentre outros, são disponibilizados e podem ser acessados, on-line, assim como realizados downloads para manipulação em softwares de geoprocessamento.

Os arquivos *shapefile* utilizados neste trabalho foram adquiridos através do SIGWeb, acessível pelo sítio eletrônico do SIEG/SEPLAN-GO, na escala 1:250.000 com *datum* SAD 69:

- Municípios do Estado de Goiás
- Limites estaduais e do Brasil
- Articulação das Folhas 1:250.000 – SAD 69
- Drenagem
- Geomorfologia
- Unidades geológicas
- Tipos e Perfis de solos

Alguns dados referentes aos recursos hídricos da área de estudo foram obtidos no sítio eletrônico da Agência Nacional de Águas (ANA) (<http://www.ana.gov.br/>). Através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) foram obtidos mapas em formato *shapefile* (.shp), contendo os conjuntos de mapas das principais bacias hidrográficas brasileiras com as seguintes informações:

- Estações pluviométricas (2010)
- Hidrografia 1:100000 (2010)
- Hidrografia 1:250000 (2010)
- Malha municipal (IBGE - 2000)
- Sedes municipais (IBGE - 2000)
- Limites das bacias e sub-bacias hidrográficas (2010)

Para usos neste trabalho, foram utilizados os arquivos *shapefile* disponibilizados pela ANA, referentes à:

- Bacia hidrográfica do Rio Paraná
- Sub-bacia do Parnaíba
- Rede de drenagem
- Tipos de solos
- Dados climatológicos (pluviometria)

Os dados listados acima complementaram o banco de dados, construído junto a outras informações relevantes, processadas e manipuladas em ambiente SIG.

#### 4.2. Implementação do algoritmo SEBAL

A metodologia utilizada para realizar a estimativa da evapotranspiração regional foi baseada na implementação do modelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) elaborado por Bastiaanssen (1995). O algoritmo SEBAL se notabiliza por fazer poucas relações e suposições empíricas, e usos de dados multiespectrais de satélites complementados com poucas informações de

superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento, obtidas nas estações meteorológicas (PCD's).

Os procedimentos metodológicos são apresentados abaixo de forma sucinta, contendo as principais etapas da implementação do algoritmo SEBAL, baseado na proposta inicial de Bastiaassen (1995), Allen, Tasumi e Trezza (2002), Paiva (2005), Mendonça (2007), Nicácio (2008), Andrade (2008), dentre outros.

A estimativa dos fluxos de energia, umidade do solo e evapotranspiração real através do algoritmo SEBAL foram baseadas em informações de imagens do sensor MODIS/TERRA. A implementação do algoritmo SEBAL foi realizada por meio de modelos construídos através da ferramenta *Model Maker* no software ERDAS Imagine 9.1, e os mapas dos produtos de saída do algoritmo SEBAL foram elaborados no software ArcMap 10.

#### 4.2.1. Correções das imagens MODIS

Cada banda das imagens MODIS/TERRA foi recortada dentro de um retângulo envolvente compreendido entre os meridianos 47°00' e 53°05' de longitude Oeste e entre os paralelos 15°05' e 20°00' Sul, para agilizar o processamento dos dados. A utilização dos dados MODIS requer o ajustamento dos números digitais de seus pixels. As bandas de refletância dos produtos MOD09GA e MOD09GQ foram corrigidas pelo fator de escala 0.0001, obtendo uma imagem de refletância da região em estudo. E ao produto MOD11A1 foi aplicado o fator de escala de 0.02 conforme especificado no site oficial do MODIS<sup>1</sup>.

#### 4.2.2. Cálculo do saldo de radiação ( $R_n$ )

A implementação do algoritmo SEBAL parte da estimativa do saldo de radiação, que consiste na primeira variável da equação do balanço de energia. Os valores referentes ao saldo de radiação para superfície ( $R_n$ ) medidos em  $W.m^{-2}$  foram obtidos conforme Allen, Tasumi e Trezza (2002), e está expresso na Equação 10.

---

<sup>1</sup> (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>).

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (10)$$

Onde,

$R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $W.m^{-2}$ );

$R_{S\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidente à superfície ( $W.m^{-2}$ );

$R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa incidente à superfície ( $W.m^{-2}$ );

$R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W.m^{-2}$ );

$\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície

$\alpha$  é o albedo da superfície

Os procedimentos adotados para calcular o valor do saldo de radiação aparecem no fluxograma da Figura 12, e na Figura 13 aparecem toda a construção do modelo realizado através da ferramenta *Model Maker* do software ERDAS Imagine 9.1 para processamento dos parâmetros biofísicos, do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo (G) e do cálculo da resistência aerodinâmica inicial ( $r_{ah_0}$ ).

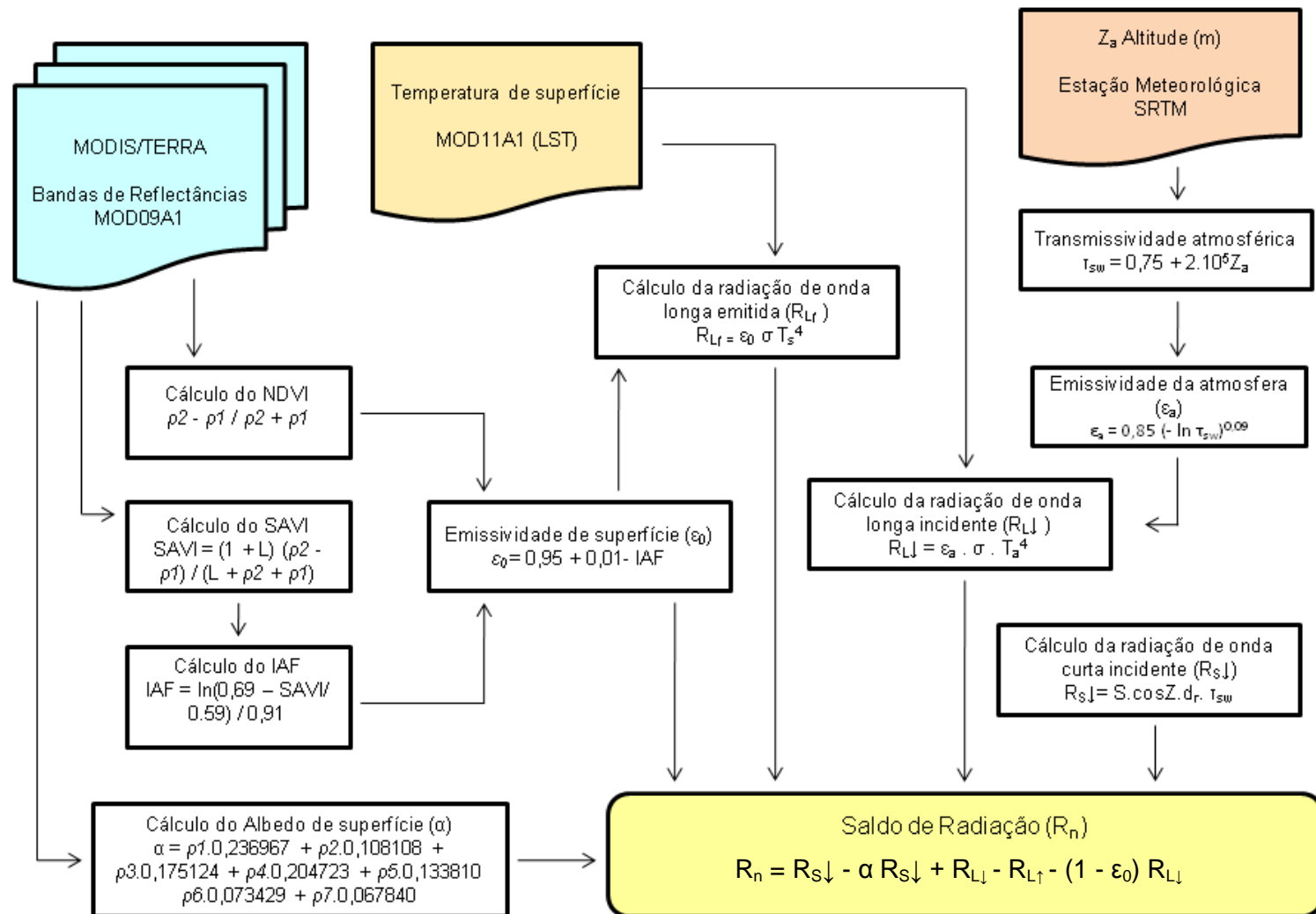
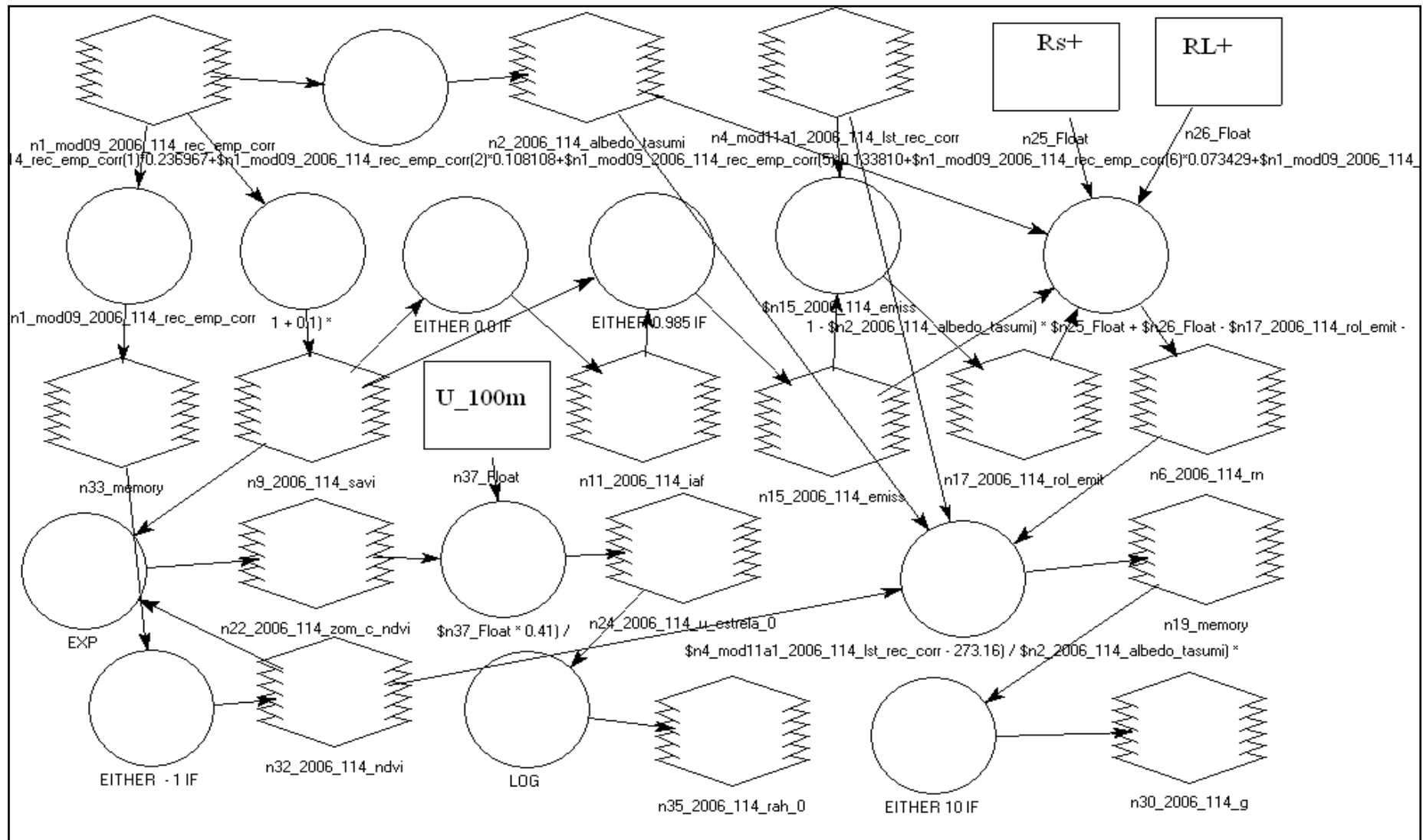


Figura 12 - Fluxograma da metodologia para o cálculo do saldo de radiação de superfície ( $R_n$ ).





**Figura 13** - Modelo construído na ferramenta *Model Maker* do software ERDAS Imagine 9.1 para calcular os parâmetros biofísicos, o saldo de radiação de superfície ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ) e a resistência aerodinâmica ( $r_{ah\_0}$ ).  
Fonte: Mendonça (2007).

#### 4.2.3. Cálculo do albedo de superfície ( $\alpha$ )

O albedo de superfície foi calculado multiplicando os valores de cada banda por um fator de correção, expressos na Equação 11, conforme Tasumi (2003) e também utilizados por Mendonça (2007) e Nicácio (2008).

$$\alpha = \rho1.0,236967 + \rho2.0,108108 + \rho3.0,175124 + \rho4.0,204723 + \rho5.0,133810 + \rho6.0,073429 + \rho7.0,067840 \quad (11)$$

#### 4.2.4. Cálculo dos parâmetros biofísicos

Os parâmetros biofísicos para aplicação no algoritmo SEBAL são: o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) o Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Estas variáveis se referem às condições da cobertura vegetal e podem ser obtidas através das imagens de sensoriamento remoto, sendo utilizadas para calcular o saldo de radiação ( $R_n$ ) e, de forma mais direta, no cálculo da emissividade de superfície ( $\epsilon_0$ ) e na estimativa da velocidade de fricção para o vento ( $u_*$ ), mais adiante.

##### 4.2.4.1. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

O índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi obtido por meio de operações algébricas entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo. No caso do sensor MODIS, o NDVI é obtido segundo a Equação 12.

$$NDVI = \rho2 - \rho1 / \rho2 + \rho1 \quad (12)$$

Onde,

$\rho1$  e  $\rho2$  são respectivamente as bandas de refletâncias de superfície 1 e 2 do sensor MODIS.

#### 4.2.4.2. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), desenvolvido por HUETE (1988), é aplicado com o objetivo de reduzir os efeitos do solo no NDVI. O SAVI também foi obtido pelo equacionamento das bandas 01 e 02 de forma idêntica ao realizado no cálculo do NDVI, porém com um fator de ajuste de fundo de solo (L) igual a 0,5 (Allen, Tasumi e Trezza, 2002) (Equação 13).

$$\text{SAVI} = (1 + L) (\rho_2 - \rho_1) / (L + \rho_2 + \rho_1) \quad (13)$$

Sendo L uma constante de ajustamento.

Para fins de usos no algoritmo SEBAL, o valor de L pode ser 0,1 ou 0,5 dependendo das características da área de estudo. O valor mais comumente encontrado na literatura é 0,5, no entanto neste trabalho foi adotado o valor 0,1. De acordo com Nicácio (2008), não são observadas expressivas variações nos fluxos de superfície a partir da modificação de L e o padrão espacial das variáveis de saída do algoritmo SEBAL foi o mesmo tanto para 0,1 como 0,5.

#### 4.2.4.3. Índice de Área Foliar (IAF)

O cálculo do Índice de Área Foliar (IAF) estabelece uma relação entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela vegetação. O cálculo do IAF foi feito utilizando a expressão sugerida por Allen, Tasumi e Trezza (2002) e por Tasumi (2003) também utilizada por Mendonça (2007) e Nicácio (2008), conforme Equação 14.

$$\text{IAF} = \ln(0,69 - \text{SAVI} / 0,59) \quad (14)$$

ln é o logaritmo neperiano.

Após a determinação dos parâmetros biofísicos foram calculados os fluxos de energia da emissividade e temperatura da superfície, por meio da aplicação da equação de Stefan-Boltzman.

#### 4.2.5. Emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ )

O cálculo da emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ) é obtida pela razão entre a energia irradiada pela superfície, a uma dada temperatura, e a energia irradiada por um corpo negro à mesma temperatura. De acordo com Nicácio (2008), para as imagens MODIS, se faz necessário calcular a emissividade para toda a faixa do infravermelho termal, conforme a Equação 15.

Se  $IAF < 3$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (15)$$

De acordo com Allen, Tasumi e Trezza (2002), se houver massa de água na área de estudo, então, deverá ser aplicado um filtro para a fixação dos valores das emissividades.

Sendo assim,

Se  $NDVI < 0$  e  $\alpha < 0,47$  então  $\epsilon_0 = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,985$

#### 4.2.6. Radiação de onda longa emitida ( $R_{L\uparrow}$ )

A radiação de onda longa emitida pela superfície ( $R_{L\uparrow}$ ), medida em  $W \cdot m^{-2}$ , foi calculada pela Equação 16.

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (16)$$

Onde,

$\epsilon_0$  é a emissividade da superfície (ALLEN, TASUMI; TREZZA, 2002).

$\sigma$  equivale a Constante de Stefan-Boltzman de valor  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$T_s$  refere à temperatura da superfície em Kelvin, obtida pelo produto LST (MOD11A1).

#### 4.2.7. Radiação de onda longa incidente ( $R_{L\downarrow}$ )

Em seguida foi estimada a radiação de longa emitida pela atmosfera em direção da superfície terrestre ( $R_{L\downarrow}$ ), em  $\text{W.m}^{-2}$ , também calculada por meio da equação de Stefan-Boltzman com a Equação 17, desenvolvida por Bastiaanssen (1995) e sugerida por Allen, Tasumi e Trezza (2002).

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (17)$$

Onde,

$\sigma$  é a Constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$T_a$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\epsilon_a$  é a emissividade da atmosfera (adimensional)

O cálculo da emissividade da atmosfera ( $\epsilon_a$ ) foi realizado por meio da Equação 18.

$$\epsilon_a = 0,85 (- \ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (18)$$

Onde,

$\tau_{sw}$  consiste na transmissividade atmosférica para condições de céu claro obtidas pela Equação 19.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z_a \quad (19)$$

$Z_a$  corresponde à altitude em metros, que pode ser obtida em estações meteorológicas localizadas na área de estudo

ou por meio de modelos digitais de elevação, a exemplo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

#### 4.2.8. Radiação de onda curta incidente ( $R_{S\downarrow}$ )

A radiação de onda curta incidente ( $R_{S\downarrow}$ ) é medida em  $W.m^{-2}$  e corresponde ao fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre estimada pela Equação 20, para condições de céu claro conforme Allen, Tasumi e Trezza (2002).

$$R_{S\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (20)$$

Onde,

$S$  é a constante solar ( $1367 W.m^{-2}$ )

$Z$  é o ângulo zenital solar, obtido no cabeçalho da imagem

$d_r$  é o quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol

$\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica

#### 4.3. **Fluxo de calor ao solo (G)**

O saldo de radiação pode ser distribuído em três partições: fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ) e fluxo de calor ao solo (G), uma vez obtida a estimativa do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), também podem ser estimados os referidos fluxos de calor, conforme destaca Nicácio (2008). Os valores do fluxo instantâneo de calor ao solo (G) medido em  $W.m^{-2}$  foram calculados em função da carta do saldo de radiação, conforme aplicação apresentada por Bastiaanssen (1995) e (2000), de acordo com a Equação 21.

$$G = [T_s / \alpha (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 NDVI^4)] R_n \quad (21)$$

Onde,

$T_s$  é a temperatura instantânea de superfície obtida através do produto LST (MOD11A1) em graus Celsius.

$\alpha$  é o albedo de superfície.

NDVI já calculado para todos os pixels (Equação 12)

$R_n$  é o saldo de radiação (Equação 10)

Segundo Allen, Tasumi e Trezza (2002) são necessárias às correções dos valores de fluxo de calor ao solo para corpos d'água cujo NDVI < 0 (Equação 22).

$$G = 0,3.R_n \quad (22)$$

#### 4.4. Fluxo de calor sensível (H)

O cálculo do calor sensível (H) é considerado por Nicácio (2008) como a parte que requer maior atenção em todo o processo equacional do algoritmo SEBAL, por haver grandes possibilidades de inserção de erros. É uma etapa em que são estabelecidas algumas hipóteses para a realização do cálculo de H, notadamente a suposição de relação linear entre a diferença de temperatura e a temperatura da superfície, que, por sua vez, está diretamente relacionada à escolha dos pixels de referência ("pixels âncoras"), que devem ser selecionados de maneira cuidadosa, já que representarão as condições extremas de temperatura e de umidade na área de interesse.

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, devido a uma diferença de temperatura. Para fins de aplicação no algoritmo SEBAL é considerado uma função do gradiente de temperatura, rugosidade da superfície, e da velocidade do vento, calculado por meio da Equação 23 (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2002).

$$H = \rho \cdot c_p \cdot dT / r_{ah} \quad (23)$$

Onde,

$\rho$  é a densidade do ar úmido (1,15 kg.m<sup>-3</sup>)

$c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$dT$  é a diferença de temperatura (em Kelvin) entre duas alturas  $z_1$  e  $z_2$  acima do plano zero de deslocamento

$r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica do ar para o transporte de calor medido em  $\text{m.s}^{-1}$

Segundo Allen, Tasumi e Trezza (2002), a dificuldade do cálculo do fluxo de calor sensível (H) consiste em resolver os valores da diferença de temperatura ( $dT$ ) entre dois planos e a resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ). O uso dos pixels de referência (“pixels âncoras”) consistem na implementação de valores de confiança para o cálculo de H, devido a possibilidade de prever e estimar os valores extremos de temperatura e, também, a velocidade do vento a uma dada altura.

No âmbito desta pesquisa, a carta de densidade do ar  $\rho$ , em  $\text{Kg.m}^{-3}$  foi obtida conforme a Equação 24, proposta por Allen et al. (1998).

$$\rho = 1000.P / 1,01.T_s.287 \quad (24)$$

Onde,

P é a pressão atmosférica do ar, medida em kPa, e estimada pela Equação 25, proposta por Allen et al. (1998).

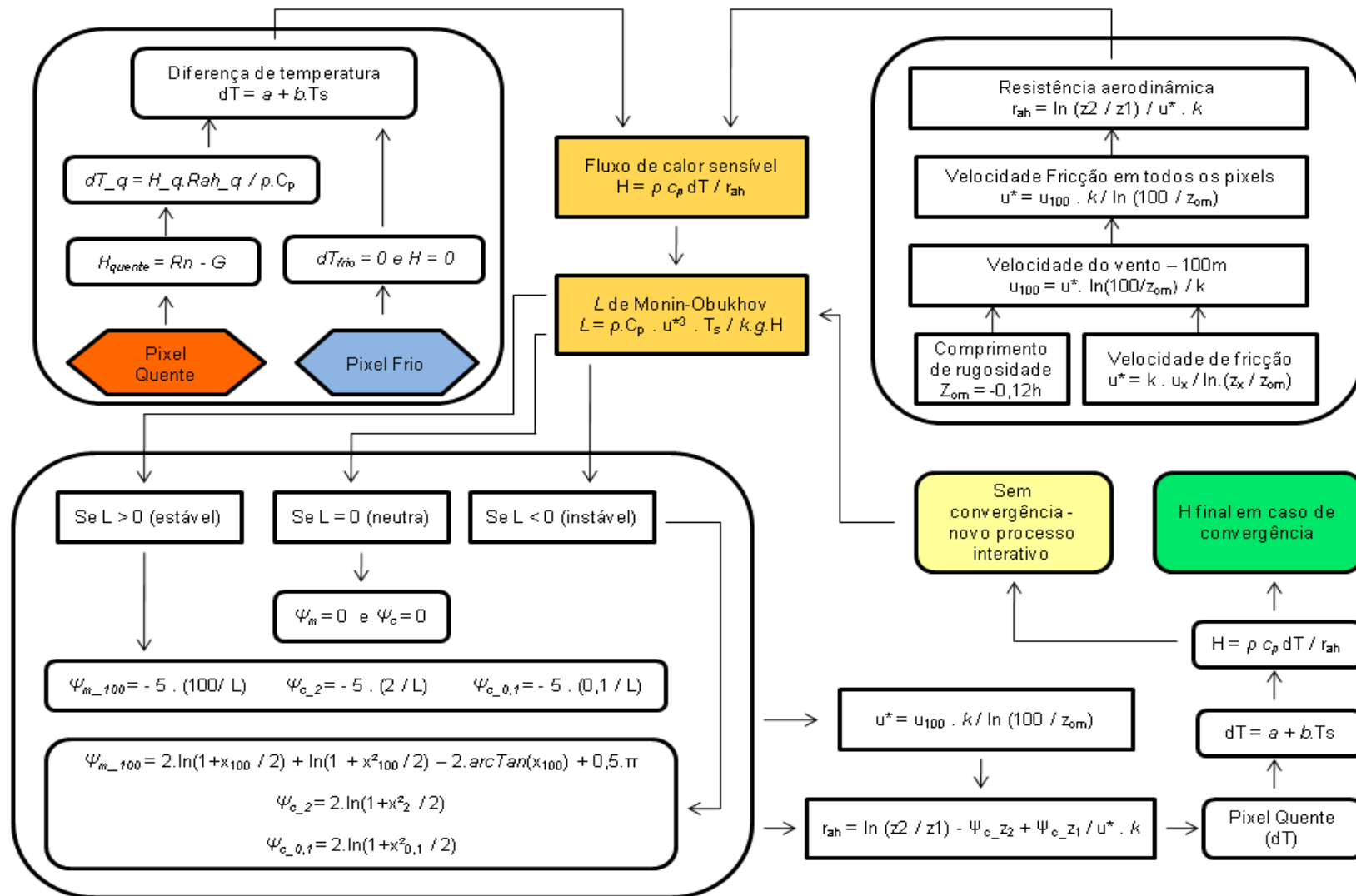
$$P = 101,3.(T_s - 0,0065.z / T_s)^{5,2} \quad (25)$$

Onde,

Z é a elevação local medida em metros.

Todo o processo interativo realizado para o cálculo do fluxo de calor sensível (H) encontra-se representado no fluxograma da Figura 14, já na Figura 15 está o modelo construído através da ferramenta *Model Maker* do software ERDAS Imagine 9.1.





**Figura 14** - Fluxograma representativo do cálculo do fluxo de calor sensível (H). Destaque para o processo iterativo de estabilização aerodinâmica de grande complexidade.

Fonte: adaptado de Nicácio (2008).



#### 4.4.1. Resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ )

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ) é calculado considerando as condições de estabilidade neutra, por meio da Equação 26.

$$r_{ah} = \ln(z_2/z_1) / u^* \cdot k \quad (26)$$

Onde,

$z_1$  e  $z_2$  são as alturas (em metros) acima do deslocamento do plano zero (d) da vegetação.

$u^*$  é a velocidade de atrito ( $m.s^{-1}$ ), que quantifica as flutuações de velocidade turbulenta no ar.

$k$  é a Constante de *Von Karman* (valor igual a 0,41 ).

A velocidade de atrito ( $u^*$ ) é calculada usando a lei logarítmica do vento neutro para as condições atmosféricas, por meio da Equação 27.

$$u^* = k \cdot u_x / \ln(z_x/z_{om}) \quad (27)$$

Onde,

$k$  é a constante de *Von Karman*

$u_x$  é a velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ )

$z_x$  altura

$z_{om}$  é o comprimento de rugosidade (m)

No âmbito desta pesquisa, a velocidade do vento foi estimada para 100 metros de altura, através da Equação 28, uma vez que, os efeitos de rugosidade da superfície podem ser considerados desprezíveis a esta altura, denominada “*blending height*”.

$$u_{100} = u^* \cdot \ln(100/z_{om}) / k \quad (28)$$

A altura de 100 metros, deduz, hipoteticamente, que a  $u_{100}$  é constante em toda a área, podendo estimar a velocidade de fricção  $u^*$  para cada pixel da imagem através da Equação 29.

$$u^* = u_{100} \cdot k / \ln(100/z_{om}) \quad (29)$$

Onde,

$z_{om}$  foi obtido em função da carta do NDVI como propõem Bastiaassen (1995) pela Equação 30.

$$z_{om} = \exp(-5,809 + 5,62 \cdot \text{SAVI}) \quad (30)$$

Onde,

SAVI é o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo.

#### 4.4.2. Diferença de temperatura (dT)

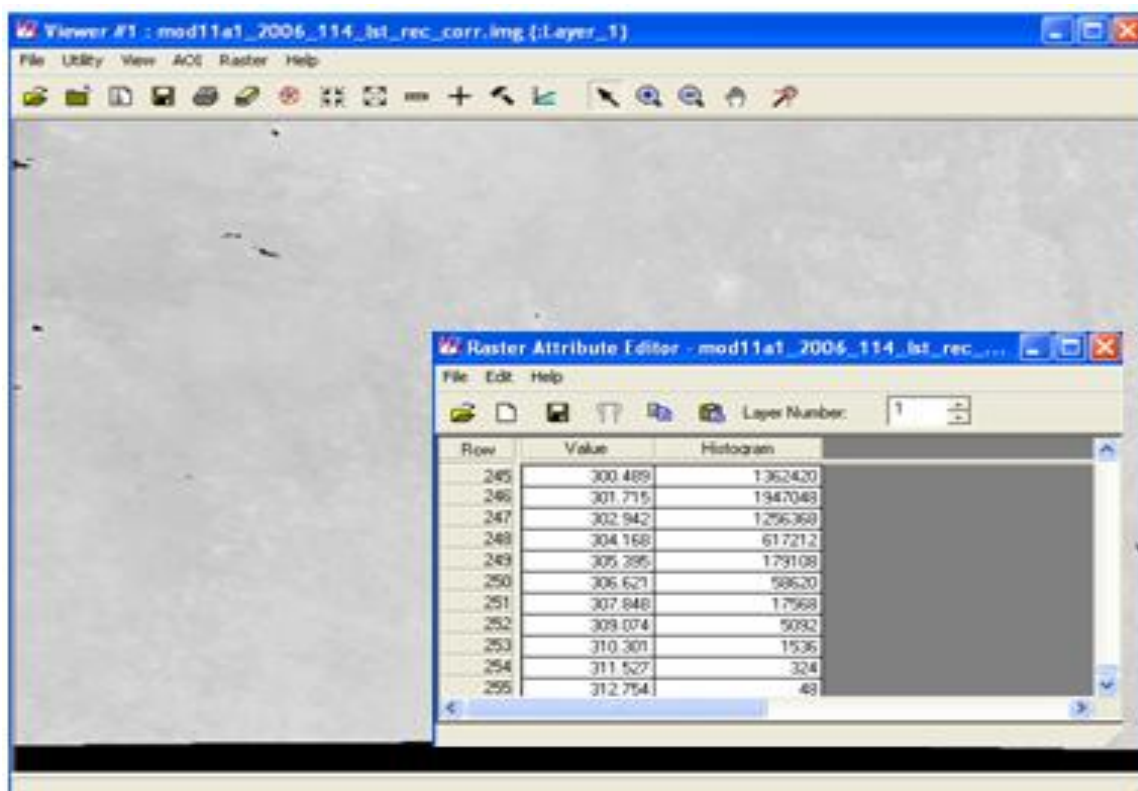
O cálculo da diferença de temperatura (dT), para cada pixel das imagens, foi obtido assumindo uma relação linear entre os valores extremos de temperatura, estimados a partir das imagens MOD11A1 (LST), de temperatura de superfície ( $T_s$ ) do sensor MODIS/Terra. Estes pixels extremos, também chamados de “pixels âncoras”, representam os menores valores de temperatura de superfície (“pixel frio”) e os maiores (“pixel quente”). Esta relação linear é representada pela Equação 31.

$$dT = a + b \cdot T_s \quad (31)$$

Onde,

$a$  e  $b$  são coeficientes empíricos, que dependem dos pixels âncoras.

A escolha dos pixels âncoras requer algumas considerações hipotéticas para identificar as áreas com maiores possibilidades de encontrar o pixel com extremos de temperatura para cada imagem. A seleção dos pixels âncoras foi realizada por meio da ferramenta *Atributes* do software ERDAS Imagine 9.1, conforme a Figura 16.



**Figura 16** - Extensão do ERDAS Imagine 9.1 utilizada para consultar os pixels âncoras na imagem MOD11A1 (LST).

Primeiramente, considera-se que o “pixel frio”, ou seja, aquele de menor valor de temperatura de superfície é encontrado em áreas de corpos hídricos, assumindo hipoteticamente que o fluxo de calor sensível é nulo. Assim, se o fluxo de calor sensível é igual a zero, o fluxo de calor latente pode ser obtido pela Equação 32.

$$\text{Se } H = 0 \Leftrightarrow \lambda ET_{\text{frio}} = R_n - G \quad (32)$$

Em segundo lugar, a escolha do “pixel quente”, ou seja, aquele de maior valor de temperatura de superfície, parte da hipótese de que ele geralmente é encontrado

em superfície de solos exposto, considerando que o fluxo de calor latente é nulo. Desta maneira, faz-se uso da Equação 33 para obter o fluxo de calor sensível.

$$\text{Se } \lambda E = 0 \Leftrightarrow H_{\text{quente}} = R_n - G = \rho \cdot C_p \cdot (a + bT_s) / r_{ah} \quad (33)$$

Onde,

$T_s$ ,  $R_n$ ,  $G$  e  $r_{ah}$  são obtidos do “pixel quente” selecionado na imagem.

A partir dos valores de  $dT$  determinados para os pixels quente e frio de cada imagens foi realizado o seguinte sistema de Equações 34 e 35, para calcular as constantes de  $a$  e  $b$ , e determinar o valor de  $H$  para todos os pixels das imagens orbitais.

$$a + b \cdot dT = r_{ah} (R_n - G) / \rho c_p \text{ (pixel quente)} \quad (34)$$

$$a + b \cdot T_s = 0 \text{ (pixel frio)} \quad (35)$$

#### 4.4.3. Correção da estabilidade atmosférica

As condições de estabilidade atmosférica devem ser consideradas neste processo iterativo por haver expressiva influência sobre a resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ), especialmente em condições de seca. No algoritmo SEBAL, o cálculo de  $H$  é repetido algumas vezes através de um número de interações, para fins de correção dos efeitos da flutuabilidade, até que ocorra a estabilização de  $r_{ah}$ , expressos na convergência de seus valores (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2002; NICACIO, 2008).

O Comprimento de Monin-Obukhov ( $L^2$ ) é utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera no processo iterativo, como descrito em sua teoria, e consiste numa função dos fluxos de calor e *momentun*. Para fins de cálculo da

---

<sup>2</sup> Neste caso  $L$  não deve ser confundido com o valor de ajuste implementado no cálculo do SAVI.

estabilidade atmosférica como Comprimento de Monin-Obukhov foi utilizada a Equação 36.

$$L = \rho \cdot C_p \cdot u^{*3} \cdot T_s / k \cdot g \cdot H \quad (36)$$

Onde,

$\rho$  é a densidade do ar ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$u^*$  é a velocidade de fricção ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{K}$ )

$k$  é a Constante de *Von Karman*

$g$  é a constante gravitacional ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Os valores de  $L$  são definidos a partir das condições de estabilidade da atmosfera, segundo as condições abaixo.

Se  $L < 0 \rightarrow$  Atmosfera instável;

Se  $L > 0 \rightarrow$  Atmosfera estável;

Se  $L = 0 \rightarrow$  Atmosfera neutra.

A partir das condições de estabilidade acima mencionadas, o cálculo dos coeficientes de correção de estabilidade atmosférica e para o transporte de calor e *momentum* ( $\psi_m$  e  $\psi_c$ , respectivamente) são obtidos pelas Equações 37 até 46.

Se  $L < 0$ , temos:

$$\psi_{m_{100}} = 2 \cdot \ln(1 + x_{100} / 2) + \ln(1 + x_{100}^2 / 2) - 2 \cdot \text{arcTan}(x_{100}) + 0,5 \cdot \pi \quad (37)$$

$$\psi_{c_{2}} = 2 \cdot \ln(1 + x_{2}^2 / 2) \quad (38)$$

$$\Psi_{c_{-0,1}} = 2 \cdot \ln(1 + x_{0,1}^2 / 2) \quad (39)$$

Onde,

$$X_{100} = (1 - 16 \cdot 100/L)^{0,25} \quad (40)$$

$$X_2 = (1 - 16 \cdot 2/L)^{0,25} \quad (41)$$

$$X_{0,1} = (1 - 16 \cdot 0,1/L)^{0,25} \quad (42)$$

Se  $L > 0$ , temos:

$$\Psi_{m_{-100}} = -5 \cdot (100/L) \quad (43)$$

$$\Psi_{c_{-2}} = -5 \cdot (2/L) \quad (44)$$

$$\Psi_{c_{-0,1}} = -5 \cdot (0,1/L) \quad (45)$$

Se  $L = 0$

$$\Psi_m = 0 \text{ e } \Psi_c = 0 \quad (46)$$

Estes coeficientes de correção da estabilidade atmosférica são utilizados para correção da velocidade de fricção e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor. Estas mudanças são notadas nos valores de  $r_{ah}$ , que por sua vez ocasionam as mudanças nas estimativas das diferenças de temperatura e nos valores dos fluxos de calor sensível. Todo o processo deve ser repetido até que ocorra a convergência dos valores numéricos de  $r_{ah}$  e  $dT$  no pixel quente. Assim ocorre o que se denomina a estabilização. Para o caso de resultados afirmativos, a imagem deve ser considerada estável e utilizada para os processos futuros como “H final”. Caso contrário realiza-se outro cálculo de  $L$ , realizando novas correções de  $u^*$  e  $r_{ah}$  ao processo iterativo. Segundo Nicácio (2008), esta convergência é encontrada a partir da quinta rodada, assim como afirma Bastiaassen (1995). No caso desta



pesquisa, a estabilização foi obtida num número de rodadas maior que cinco, ficando entre 5 e 10 rodadas do processo iterativo.

Os valores de  $u^*$  e  $r_{ah}$  para os pixels de cada imagem foram corrigidos a partir das Equações 47 e 48, também, por meio dos valores de  $\Psi_m$  e  $\Psi_c$  corrigidos.

$$u^* = u_{100} \cdot k / \ln (100 / z_{om}) - \Psi_{m_{100}} \quad (47)$$

$$r_{ah} = \ln (z_2 / z_1) - \Psi_{c_{z_2}} + \Psi_{c_{z_1}} / u^* \cdot k \quad (48)$$

#### 4.5. Fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ )

A partir da elaboração das cartas de  $R_n$ ,  $G$  e  $H$  foi estimado o fluxo de calor latente instantâneo ( $\lambda ET$ ), sendo este um resíduo da equação do balanço de energia, conforme a Equação 49.

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (49)$$

Onde,

$\lambda ET$  é o fluxo de calor latente ( $W.m^{-2}$ )

$R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $W.m^{-2}$ )

$G$  é o fluxo de calor no solo ( $W.m^{-2}$ );

$H$  é o fluxo de calor sensível ( $W.m^{-2}$ )

#### 4.6. Evapotranspiração real horária ( $ET_h$ )

O fluxo de calor latente pode ser convertido em evapotranspiração real horária, de acordo com a Equação 50, elaborada por Tasumi (2003). É um processo algébrico simples que consiste em converter os valores de segundos para hora.

$$ET_h = 3600 \cdot \lambda ET / \lambda \quad (50)$$

Onde,

$ET_h$  é a evapotranspiração real horária ( $\text{mm.h}^{-1}$ )

$\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $\text{J.kg}^{-1}$ ), que representa a energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água, dado conforme Harrison, 1963, a partir da Equação 51.

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 \cdot (T_s - 273,16)] \cdot 10^6 \quad (51)$$

$T_s$  a temperatura da superfície (K) (produto MOD11A1)

#### 4.7. Evapotranspiração real diária ( $ET_{24H}$ )

A partir do cálculo da evapotranspiração horária é possível obter a evapotranspiração real diária, com base no conceito de fração evaporativa, que é uma razão entre o fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ) e a diferença entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no solo ( $G$ ) (Equação 52).

$$\Lambda = \lambda ET / R_n - G \quad (52)$$

$\Lambda$  é a fração evaporativa no instante da passagem do satélite. Desta maneira, tem-se a fração evaporativa diária a partir da Equação 53, considerando que para dias de céu claro existe uma regularidade e uma constância para a fração evaporativa.

$$ET_{24h} = 86400 \cdot \Lambda \cdot R_{n24h} / \lambda \quad (53)$$

Onde,

$ET_{24h}$  é a evapotranspiração real diária em cada pixel ( $\text{mm.dia}^{-1}$ )

$\Lambda$  é a fração evaporativa no instante da passagem do satélite

$R_{n24h}$  é o saldo de radiação médio de 24 horas (BASTIAANSSEN et al., 2005) ( $\text{W.m}^{-2}$ ), obtido pela Equação 54.

$$R_{n24h} = (1-\alpha) \cdot R_{s24h} - 110 \cdot T_{sw24} \quad (54)$$

$\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $J \cdot kg^{-1}$ )

Segundo Bastiaanssen e Ali (2003), os valores da fração evaporativa variam de 0 e 1 em condições não advectiva.

O calculo do fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ), da fração evaporativa de referencia, da evapotranspiração real horária ( $ET_h$ ) e da evapotranspiração real diária ( $ET_{24H}$ ), foram calculadas através do modelo construído na ferramenta *Model Maker*, do software Erdas Imagine 9.1, conforme representado na Figura 17. Foi aplicado este modelo para estimar os referidos valores de evapotranspiração utilizando os parâmetros referentes aos pixels com extremos de temperatura (pixel quente e frio), proposição “H CLÁSSICO” e também para os parâmetros obtidos a partir do pixel da estação, denominado de proposição “H ESTAÇÃO”.

A determinação dos valores de  $R_{s24h}$  foi realizada por meio de uma aproximação realizada por Mendonça (2007), para estimativa dos ciclos diurnos do  $R_n$  e da  $R_{s_d}$  para dias de céu claro, conforme as Equações 55 e 56.

$$R_n = R_{n\_sebal} * [\text{sen}(((T_{pass} - T_{nas}) / (T_{por} - T_{nas})) * \pi)]^{-1} * \text{sen}[(T_{inic} - T_{nas}) * \pi] \quad (55)$$

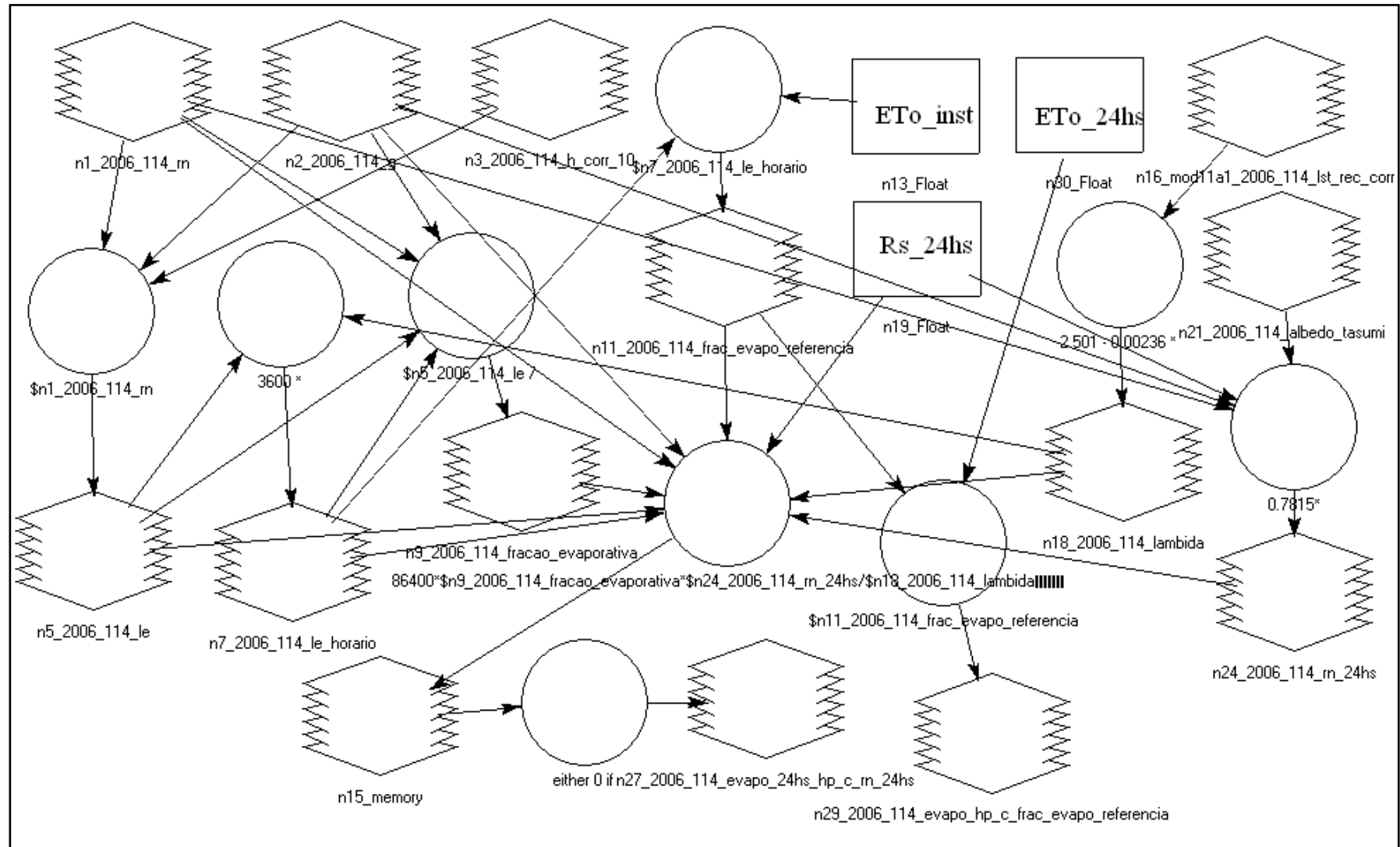
$$R_s = R_{s\_sebal} * [\text{sen}(((T_{pass} - T_{nas}) / (T_{por} - T_{nas})) * \pi)]^{-1} * \text{sen}[(T_{inic} - T_{nas}) * \pi] \quad (56)$$

Onde,

$T_{pass}$  é o tempo local da passagem do sensor.

$T_{nasc}$  e  $T_{por}$  o tempo local no qual o valor do saldo de radiação é positivo e negativo, respectivamente.

$T_{inic}$  é a hora local da primeira observação do dia, em UTM.



**Figura 17** - Modelo construído para calcular o fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ), da evapotranspiração real horária ( $ET_h$ ) e da evapotranspiração real diária ( $ET_{24h}$ ). Fonte: Mendonça (2007).

O cálculo do fotoperíodo (N), em hora, foi necessário para determinar os horários do nascer ( $T_{nasc}$ ) e do ocaso ( $T_{por}$ ) do Sol, feito pela Equação 57.

$$N = 2.(H+0,83) / 15 \quad (57)$$

Onde,

H é medido graus e calculado pela Equação 58.

$$H = \text{arc.cos}(-\text{tg}\varphi.\text{tg}\delta) \quad (58)$$

Onde,

$\varphi$  é a latitude local e  $\delta$  a declinação solar, em radianos.

Os horários, em UTC, do nascer e do ocaso do Sol foram determinados pelas seguintes Equações 59 e 60.

$$T_{nasc} = 12 - N/2+3 \quad (59)$$

$$T_{por} = 12+N/2+3 \quad (60)$$

Para calcular os valores de  $R_{n24h}$  e  $R_{s\downarrow 24h}$  foram utilizadas as Equações 61 e 62.

$$R_{n24h} = R_{n\_sebal} * [12*\pi*\text{sen}((T_{pas}-T_{nas} / T_{por}-T_{nasc})*\pi)]^{-1}*(T_{por} - T_{nasc}) \quad (61)$$

$$R_{s24h} = R_{n\_sebal} * [12*\pi*\text{sen}((T_{pas}-T_{nas} / T_{por}-T_{nasc})*\pi)]^{-1}*(T_{por} - T_{nasc}) \quad (62)$$

A partir dos valores de  $R_{n24h}$ ,  $R_{s24h}$  e do albedo de superfície, retirados dos pixels das estações Morrinhos e São Simão, foi realizada uma regressão linear entre esses valores para obter os valores de seus respectivos coeficientes  $a_1$  e  $b_1$  para então, calcular a carta de  $R_{n24h}$  como função do balanço de onda curta.

Para determinação da regressão linear utilizou-se a seguinte Equação 63.

$$R_{n24h} = a_1(1 - \alpha) * R_{s24h} + b_1 \quad (63)$$

Segundo Allen, Tasumi e Trezza (2002) a fração evaporativa de referencia (ETrF) é definida como a taxa obtida entre a carta de  $ET_{inst}$  e a  $ET_o$  integrada na mesma hora e computada com dados obtidos numa estação meteorológica, sendo calculada pela Equação 64.

$$ETrF = ET_{inst} / ET_{FAO56} \quad (64)$$

Por meio deste cálculo são gerados coeficientes de cultivo horário ( $kc_h$ ) admitindo-se que esta relação represente a relação diária, pela Equação 65.

$$Kc_h = ET_{inst} / ET_o = ET_{24} / ET_{o24} \quad (65)$$

Por meio desta relação, pode-se, então obter  $ET_{24h}$  em  $mm.d^{-1}$  por meio da Equação 66.

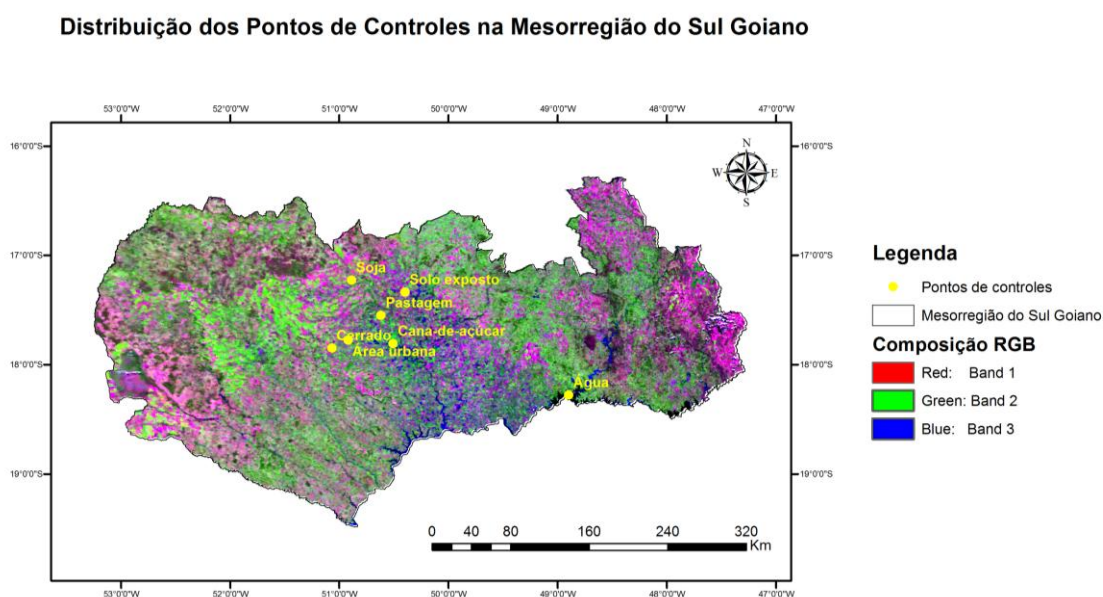
$$ET_{24} = ETrF * ET_{o24} \quad (66)$$

Desta maneira, seguindo a metodologia apresentada, foram calculados quatro valores de evapotranspiração pelo algoritmo SEBAL para o mesmo dia, sendo as Equações 53 e 66 aplicadas às proposições “H CLÁSSICA” e “H ESTAÇÃO”.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos pela implementação do algoritmo SEBAL são apresentados e discutidos nesta unidade e estão dispostos seguindo a sequência em que foram processados a partir do cálculo dos parâmetros biofísicos NDVI, SAVI e IAF passando pelas variáveis necessárias ao cálculo do balanço de energia em superfície, albedo ( $\alpha$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ), fluxo de calor sensível ( $H$ ) e fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ), finalizando com os valores obtidos de evapotranspiração pelo método FAO-56 e estimados pelo algoritmo SEBAL.

Foram selecionados sete pontos de controle na mesorregião do Sul Goiano, para análise dos valores das variáveis do SEBAL. Cada ponto consiste no valor de um pixel representativo das áreas de típica de cerrado pertencente a uma reserva ambiental, pastagem, cana-de-açúcar, soja nos anos de 2006, 2007 e 2008 sendo tornada uma área de pousio nos anos de 2009 e 2010, solo exposto, água e área urbana referente à cidade de Rio Verde, conforme representados na Figura 18.



**Figura 68** - Posicionamento dos pontos de controles utilizados para coleta dos dados processados através do algoritmo SEBAL na mesorregião do Sul Goiano. Composição R (banda6), G (banda2) e B (banda1) de imagem do sensor MODIS/TERRA. Data Juliana: 100/2010.

A partir de cada ponto de controle foram realizados sete recortes de 16 pixels para cada tipo de usos referentes a cada ponto de controle utilizado, como

apresentado na Figura 18, servindo, desta maneira, para fins de comparação entre os dados obtidos pelo algoritmo SEBAL em cada data juliana, para os dias 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

### 5.1. Parâmetros Biofísicos

Os parâmetros biofísicos consistem em dados de NDVI, SAVI e IAF e são importantes na medida em que fornecem características das condições naturais da cobertura do solo e para algumas superfícies como área urbana e corpos hídricos. São fatores que influenciam diretamente o balanço de energia de superfície e, por conseguinte o fenômeno da evapotranspiração, expressando, desta maneira, possibilidades diferenciadas no particionamento de energia para área de estudo.

Os valores de NDVI, SAVI e IAF obtidos em cada um dos pixels dos sete pontos de controle estão representados na Tabela 4, para fins de análise e comparação.

**Tabela 4** - Valores de NDVI, SAVI e IAF e albedo coletado nos sete pontos de controles na área de estudo, para as datas 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

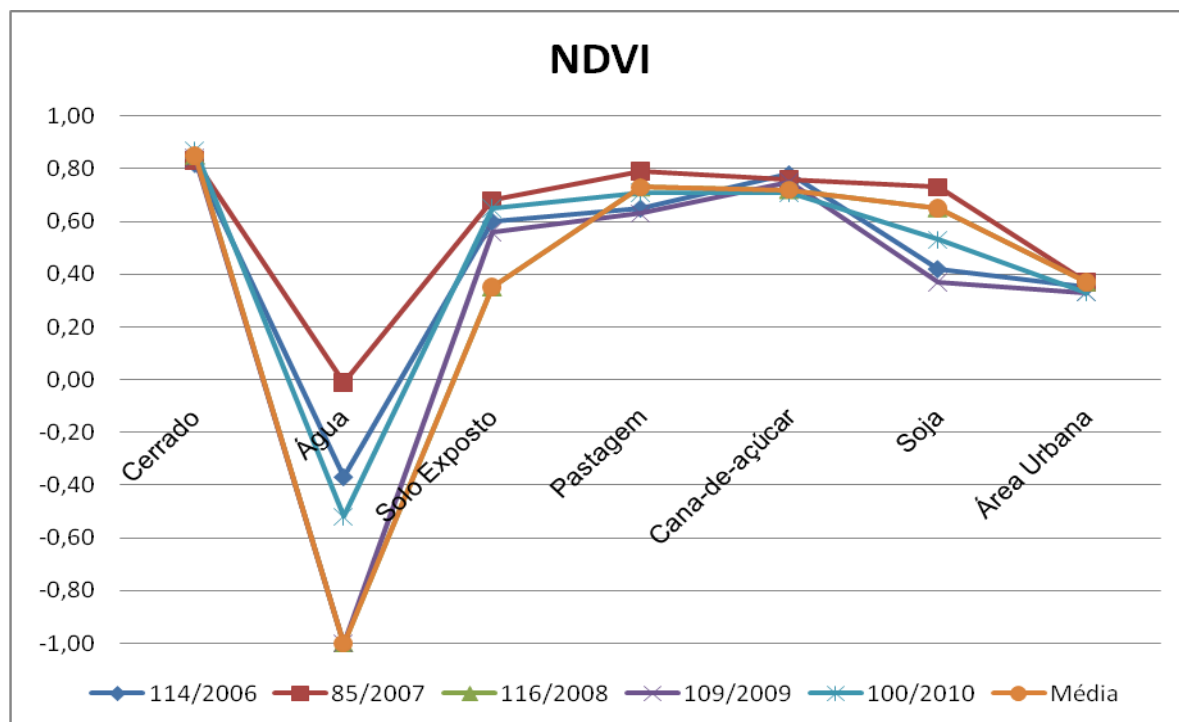
		Pontos de controle						
		Cerrado	Água	Solo Exposto	Pastagem	Cana de açúcar	Soja	Área Urbana
2006	NDVI	0,82	-0,37	0,60	0,65	0,78	0,42	0,35
	SAVI	0,71	-0,10	0,53	0,58	0,71	0,37	0,31
	IAF	7,00	0,00	1,48	1,90	7,00	0,69	0,48
2007	NDVI	0,83	-0,01	0,68	0,79	0,76	0,73	0,37
	SAVI	0,73	0,00	0,62	0,74	0,69	0,66	0,32
	IAF	7,00	0,00	2,49	7,00	7,00	3,32	0,53
2008	NDVI	0,85	-1,00	0,35	0,73	0,72	0,65	0,37
	SAVI	0,70	-0,12	0,29	0,66	0,62	0,56	0,30
	IAF	7,00	0,00	0,44	3,43	2,38	1,74	0,47
2009	NDVI	0,84	-1,00	0,56	0,63	0,75	0,37	0,33
	SAVI	0,69	-0,16	0,44	0,55	0,65	0,31	0,27
	IAF	7,00	0,00	0,94	1,60	3,13	0,51	0,38
2010	NDVI	0,87	-0,52	0,65	0,71	0,71	0,53	0,33
	SAVI	0,77	-0,08	0,59	0,64	0,63	0,47	0,28
	IAF	7,00	0,00	1,97	2,80	2,55	1,08	0,41
<b>Média</b>	<b>NDVI</b>	<b>0,84</b>	<b>-0,58</b>	<b>0,57</b>	<b>0,70</b>	<b>0,74</b>	<b>0,54</b>	<b>0,35</b>
	<b>SAVI</b>	<b>0,72</b>	<b>-0,09</b>	<b>0,49</b>	<b>0,63</b>	<b>0,66</b>	<b>0,47</b>	<b>0,30</b>
	<b>IAF</b>	<b>7,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,46</b>	<b>3,35</b>	<b>4,41</b>	<b>1,47</b>	<b>0,45</b>



Sob um aspecto geral, os valores das variáveis coletadas estão coerentes com os respectivos tipos de cobertura do solo. No ponto de controle retirado sobre a superfície d'água os valores de NDVI e SAVI foram negativos e no caso do IAF todos foram igual a 0 (zero), como geralmente são relatados na literatura científica. No ponto referente à área urbana foram encontrados os valores mais baixos de NDVI, SAVI e IAF sendo justificado pela baixa concentração de vegetação ou sua quase ausência. Seus valores médios anuais foram de 0,35, 0,45 e 0,30, respectivamente. Os valores encontrados no ponto referente ao solo exposto foram maiores do que aqueles encontrados no pixel de plantio de soja, nas datas de 114/2006, 109/2009 e 100/2010, como podem ser observados pela Tabela 4. Os valores médios entre as datas julianas foram ligeiramente maiores para o solo exposto no NDVI e no SAVI enquanto o valor de IAF foi menor para o solo exposto. Estes valores podem estar relacionados à baixa resolução do sensor MODIS/Terra dificultando o registro num pixel de área com diversidades de usos do solo. Deve-se observar que nas datas de 109/2009 e 100/2010 o pixel referente ao plantio de soja estava submetido ao pousio o que explicaria os baixos valores de NDVI e SAVI. Através da Tabela 4, ainda podemos que os valores de SAVI encontram-se menores do que os valores de NDVI, isto devido ao fator de ajustamento ao solo em que é processado pelo SAVI.

#### 5.1.1. NDVI

O gráfico da Figura 19 é apresentado o comportamento do NDVI de cada pixel dos pontos de controles coletados. Pode-se observar que os valores médios mantiveram-se na faixa entre 0 e até pouco mais de 0,84 e as áreas de cerrado mantiveram os máximos valores encontrados. Em todas as datas os valores de NDVI para o pixel do cerrado estiveram acima de 0,80 enquanto os pixels de pastagem, cana-de-açúcar e soja estiveram entre 0,60 e 0,80, com exceção as datas julianas 109/2009 e 100/2010, em que ficaram abaixo de 0,60. As áreas de solo exposto e área urbana mantiveram seus pixels de referencia com valores abaixo de 0,40 em todas as datas processadas. Os valores mais coerentes foram os de cerrado, cana-de-açúcar e área urbana e os mais discrepantes foram os de solo exposto, pastagem e soja.



**Figura 19** - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de NDVI dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

Em aplicação do algoritmo SEBAL em glebas com o plantio de cana-de-açúcar, Andrade (2008) obteve valores de NDVI médio de 0,30 e 0,70 ao longo de um ano, chegando a valores máximos de 0,87, assim como Aguiar et al. (2008), em levantamentos com imagens MODIS, encontrou valores máximos em torno de 0,75 e 0,90 em áreas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Segundo Ferreira et al. (2005), em estudo sobre o comportamento das fitofisionomias encontradas no cerrado, do estado de Goiás, alguns usos do solo, tais como a agricultura e pastagem, juntamente com o cerrado, apresentam poucas variações em indicadores biofísicos, como NDVI, devido ao domínio de apenas uma espécie vegetal anual, marcada pela monocultura em áreas agrícolas e por gramínea nas áreas de pasto. Os autores encontraram valores de NDVI variando entre 0,50 e 0,80 ao longo de um ano, para as áreas de pastagem e de 0,40 até próximo de 0,85 nas áreas de agricultura, especialmente entre os meses de março e maio, em amostras retiradas na mesorregião do Sul Goiano.

De acordo com Rizzi e Rudorff (2007), os valores de NDVI para soja tendem à estabilização a partir de fevereiro comprovada na perda de sensibilidade ao

acréscimo de fitomassa em estados fenológicos mais avançados. O decréscimo abrupto dos valores de NDVI, a partir de março, expressa a diminuição da fitomassa verde da soja no final do ciclo.

Os valores médios de NDVI obtidos pelas imagens que geraram as cartas de NDVI estão representados na Tabela 5. Pode-se observar que os valores médios das imagens para as cinco datas julianas mantiveram-se bem coesas, variando entre 0,64 (85/2008) e 0,97 (114/2006). Os elevados valores de NDVI médios são justificados pelo predomínio das áreas vegetadas na maior parte da mesorregião do Sul Goiano.

**Tabela 5** - Valores médios de NDVI calculados a partir de cada imagem processada no modelo SEBAL.

DJ	NDVI					
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão
114/2006	0	1	0,97	0,69	0,71	0,14
85/2007	0	1	0,64	0,67	0,70	0,16
116/2008	0	1	0,65	0,68	0,72	0,16
109/2009	0	1	0,65	0,69	0,71	0,17
100/2010	0	1	0,66	0,68	0,71	0,15

Os valores médios obtidos de cada recorte de 16 pixels retirados a partir dos pontos de controles estão apresentados na Tabela 6.

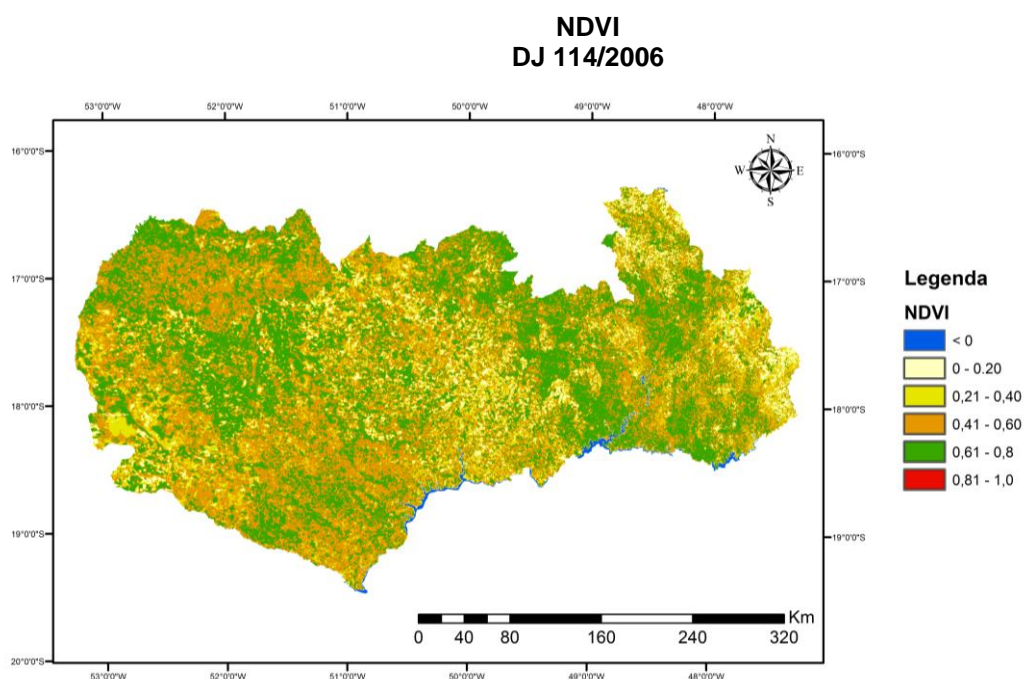
**Tabela 6** - Valores médios de NDVI dos recortes representativos de cada tipo de uso do solo.

DJ	Valores médios de NDVI						
	Cerrado	Água	Solo exposto	Pastagem	Cana de açúcar	Soja	Área urbana
114/2006	0,55	-0,71	0,24	0,42	0,54	0,53	0,24
85/2007	0,55	-0,71	0,25	0,41	0,53	0,50	0,23
116/2008	0,57	-0,79	0,26	0,43	0,49	0,56	0,21
109/2009	0,54	-0,46	0,38	0,41	0,51	0,35	0,21
100/2010	0,57	-0,46	0,47	0,39	0,51	0,36	0,20
<b>Média</b>	<b>0,55</b>	<b>-0,62</b>	<b>0,32</b>	<b>0,41</b>	<b>0,51</b>	<b>0,46</b>	<b>0,22</b>

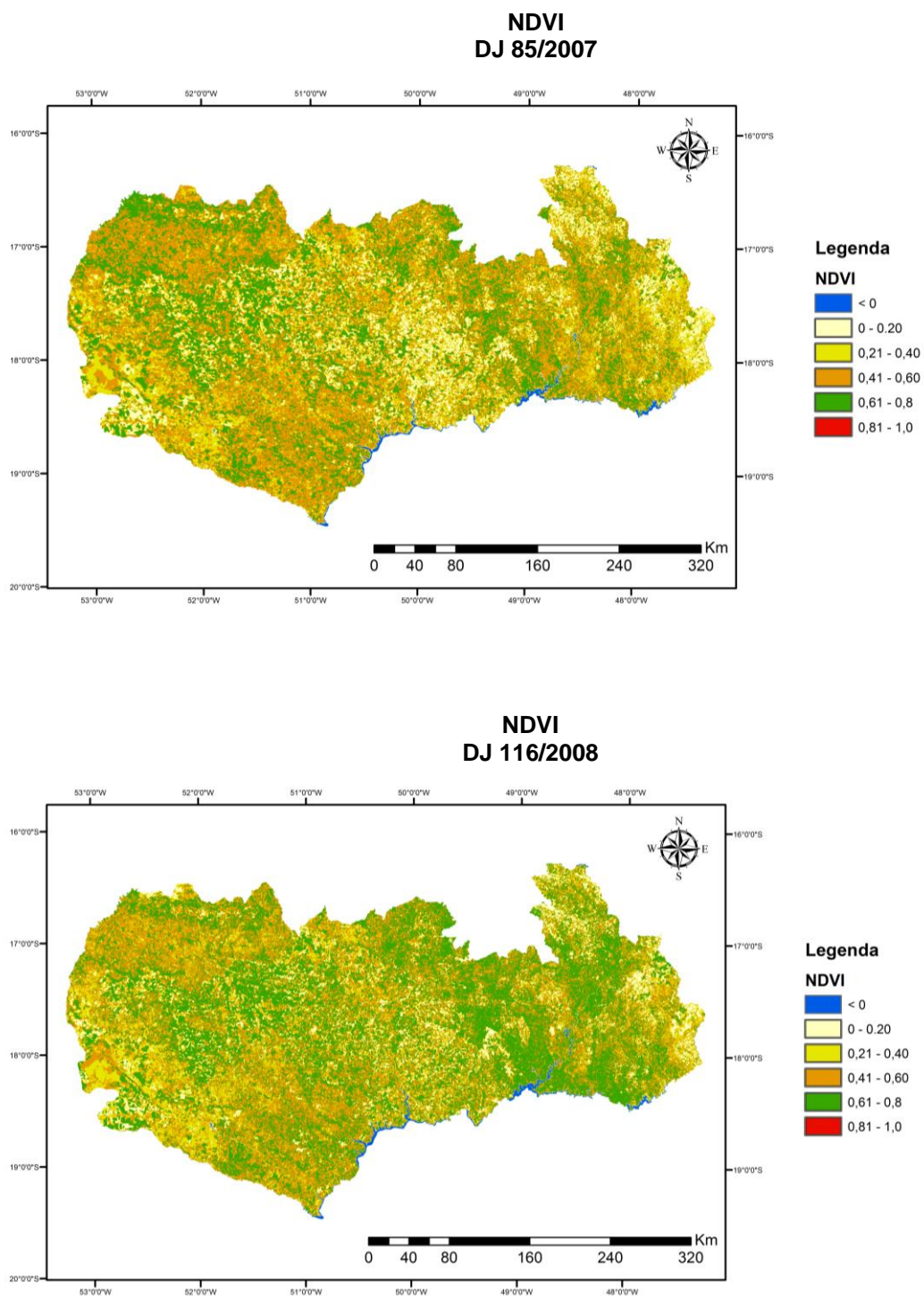
Os valores médios de NDVI foram de 0,55, 0,41, 0,51 e 0,46, respectivamente, para os recortes de cerrado, pastagem, cana-de-açúcar e soja.

Os valores de NDVI médios mantiveram-se de forma regular dentro do período em que foi processado o SEBAL, ou seja, nos meses de março e abril. Estes valores corroboram os resultados obtidos por Gurgel, Ferreira e Luiz (2003) para as áreas do cerrado brasileiro, em que não foram encontradas variações significativas no NDVI entre cada uma das estações, chuvosa e seca, ao longo do ano, quando a perda das folhas acontece somente devido à escassez das chuvas.

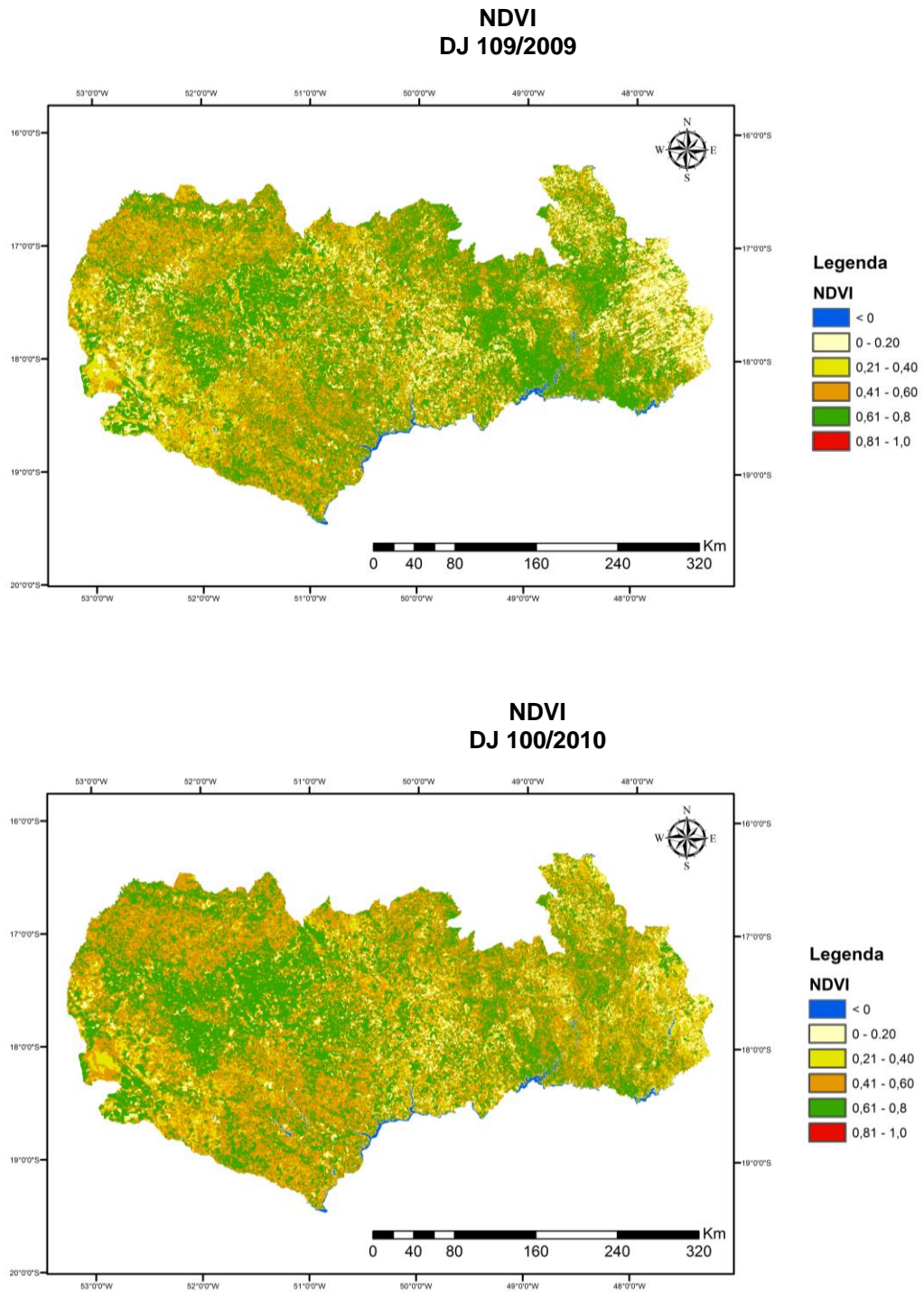
Os mapas de NDVI estão representados nas Figuras 20, 21 e 22. Por meio destes mapas podem-se observar as variações do NDVI, de forma especializada, por toda a mesorregião do Sul Goiano, identificando áreas com diferentes valores, para cada data. Estas variações supõem que ocorreram mudanças na cobertura do solo, ao longo do período observado. Os maiores valores de NDVI foram encontrados em algumas manchas em verde escuro na porção noroeste e nordeste da área de estudo, mantendo valores entre 0,41 até 0,80 exatamente onde predominam as áreas cobertas por vegetação nativa, a exemplo do cerrado. Nas porções sudoeste e central, podem ser observados os menores valores de NDVI, variando entre 0 (zero) a 0,60 representados pelas cores amarelo e coral, devido a maior existência de áreas de solo exposto e voltadas para agropecuária. Na porção central são encontradas as áreas de monocultura de grãos como soja e milho, de cana-de-açúcar e vastas áreas de pastagem.



**Figura 20** – Mapa de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.



**Figura 21 -** Mapas de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 85/2007 e 116/2008.



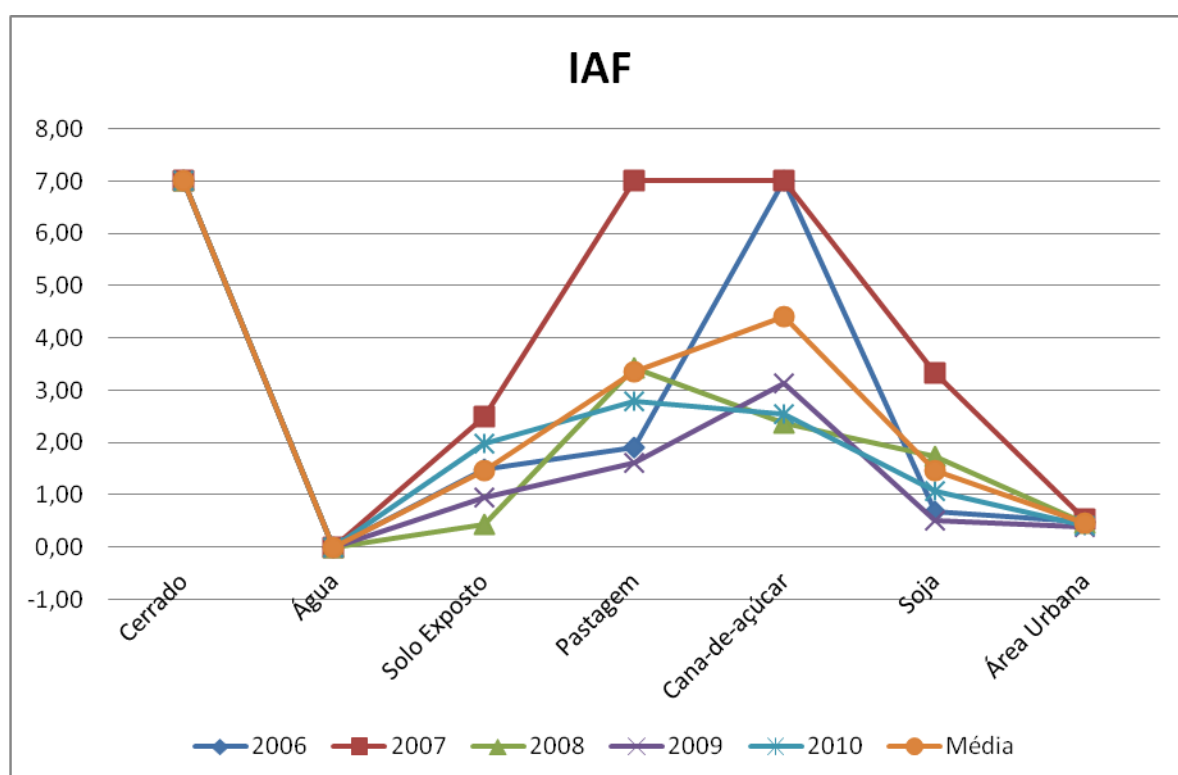
**Figura 22** - Mapas de espacialização do Índice da Diferença Normalizada da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 109/2009 e 100/2010.



### 5.1.2. IAF

O Índice de Área Foliar é um importante indicador utilizado no algoritmo SEBAL como parâmetro das condições naturais da vegetação. O IAF, assim como o NDVI e o SAVI, varia no tempo e no espaço de acordo com a dinâmica de desenvolvimento da vegetação e das mudanças da cobertura do solo.

A distribuição do IAF estimado em cada um dos sete pixels de referência de usos do solo coletados na área de estudo está representada na Figura 23.



**Figura 23** - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores de IAF dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

Na Figura 23 pode-se observar que os valores de IAF atingiram o máximo (7,0) no pixel de cerrado, em todas as cinco datas julianas processadas. Os valores mínimos (zero) foram obtidos no pixel de água como era esperado. Os pixels de pastagem, cana-de-açúcar e soja tiveram as maiores diferenças nos valores coletados, variando entre 0,5 até 7,0. Estes valores de IAF para estes três usos do solo são justificados, uma vez que, correspondem ao período de máximo crescimento das espécies cultivadas, em que ocorrem o corte da cana-de-açúcar e a

colheita da soja na região. O pixel de solo exposto apresentou uma variação nos valores de IAF entre 0,5 e 2,5 e, isto pode ser explicado devido ao pixel estar próximo a áreas de pastagem onde ocorre alguma vegetação presente na área do pixel. No pixel representativo de área urbana foram obtidos valores muito baixos, próximo a 0,5, nas cinco datas processadas o que também era esperado, em função da pouca presença de vegetação.

Na Tabela 7 e 8 são apresentados os valores médios das imagens que geraram os mapas de IAF e os valores médios dos recortes referentes aos sete diferentes tipos coberturas do solo analisados na mesorregião do Sul Goiano. Pode-se observar que os valores médios de IAF ficaram entre 2,41(109/2009) e 2,97 (114/2006) variando muito pouco ao longo dos cinco anos. Uma vez que os valores foram coletados no período úmido do ano, eles estão coerentes já que a maioria das espécies vegetais está com máxima cobertura de área foliar.

**Tabela 7** - Valores do Índice de Área Foliar das imagens processadas nas datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

IAF						
Data	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Moda	Desvio Padrão
114/2006	0	7,0	2,97	2,32	6,98	1,94
85/2007	0	7,0	2,70	2,10	6,98	1,88
116/2008	0	7,0	2,42	1,90	6,98	1,73
109/2009	0	7,0	2,41	1,90	6,98	1,75
100/2010	0	7,0	2,83	2,21	6,98	1,89

**Tabela 8** - Valores médios de IAF dos recortes representativos de cada tipo de uso do solo.

Valores médios de IAF							
DJ	Cerrado	Água	Solo exposto	Pastagem	Cana de açúcar	Soja	Área urbana
114/2006	5,27	0,00	0,45	1,10	3,98	1,29	0,32
85/2007	5,29	0,00	0,87	1,10	4,03	2,50	0,31
116/2008	5,17	0,00	0,54	1,24	1,67	1,58	0,22
109/2009	4,57	0,00	0,78	1,00	1,89	0,40	0,25
100/2010	5,47	0,00	1,95	0,96	2,08	0,46	0,23
<b>Média</b>	<b>5,15</b>	<b>0,00</b>	<b>0,92</b>	<b>1,08</b>	<b>2,73</b>	<b>1,25</b>	<b>0,27</b>

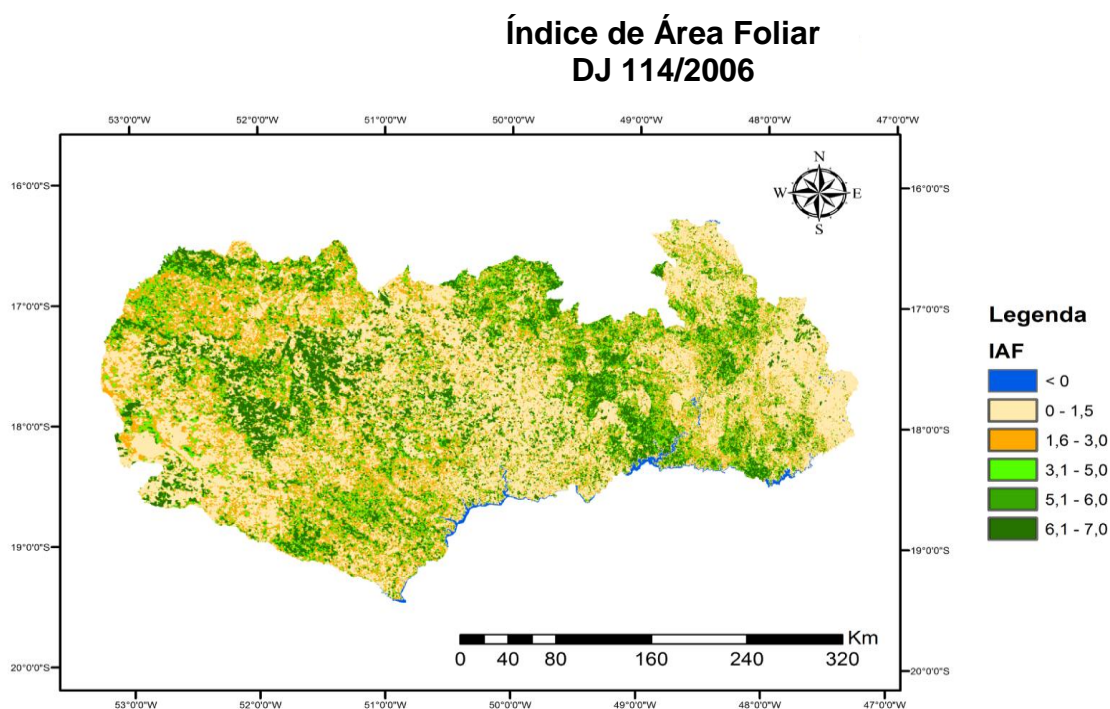


Analisando os valores para cada uso do solo coletado pelos recortes selecionados é possível observar que as áreas com cerrado mantiveram os valores médios na média de 5,15, as áreas de plantio de cana-de-açúcar com valores de 2,73, as áreas de soja com valores de 1,25 e as áreas de pastagem o valor médio foi de 1,08. As áreas de solo exposto e área urbana mantiveram os valores médios mais baixos, como esperado, sendo de 0,92 e 0,27 respectivamente.

Segundo Oliveira et al. (2007), em experimento utilizando três espécies distintas de cana-de-açúcar, foram encontrados valores intermediários de IAF chegando até 4,0 entre os meses de dezembro e março, no estado do Paraná. Estes valores de IAF apontam para o maior crescimento da cana-de-açúcar nos meses de janeiro a março, devido às adequadas condições de temperatura e precipitação pluviométrica para o desenvolvimento da planta.

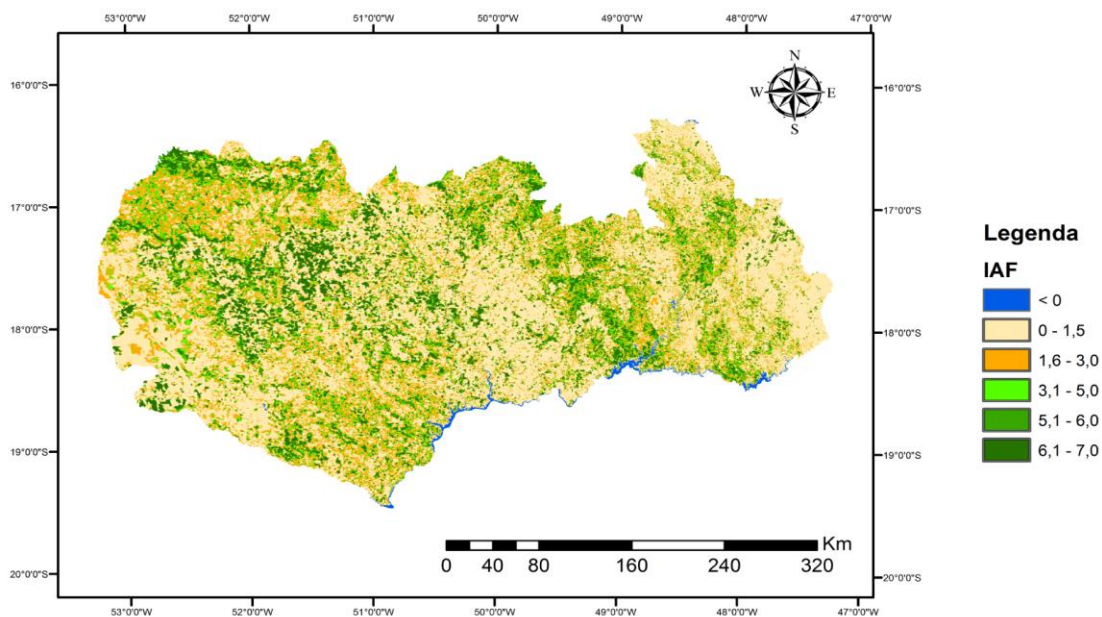
De acordo com Rizzi e Rudorff (2007), a soja apresenta um incremento no IAF a partir do mês de fevereiro coincidindo com o período de maior desenvolvimento da planta.

Nas Figuras 24, 25 e 26 estão representados os mapas do IAF das imagens processadas pelo algoritmo SEBAL.

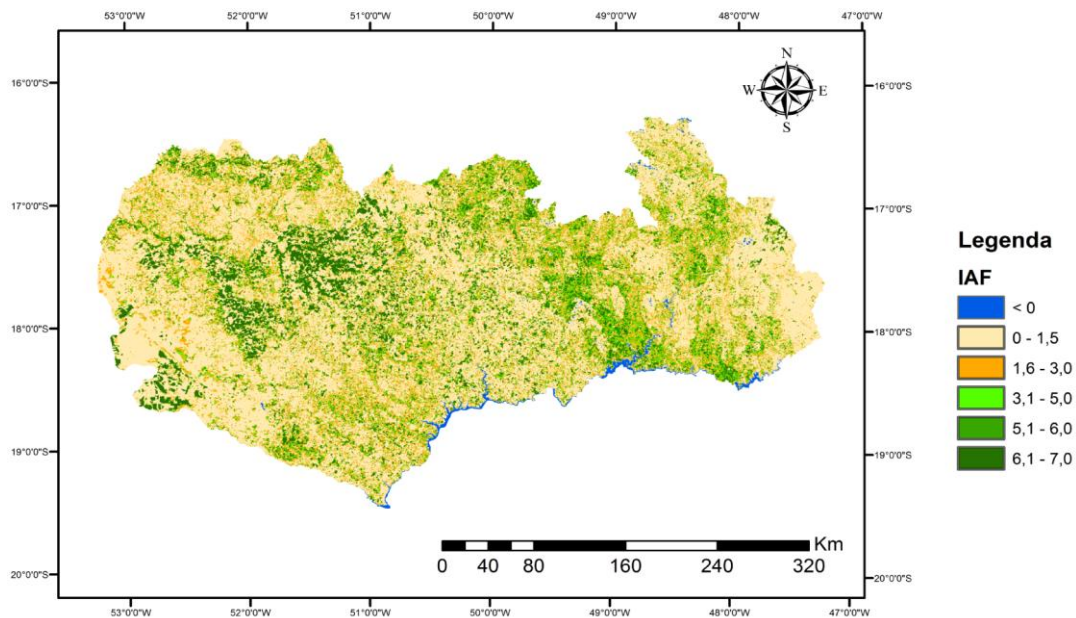


**Figura 24** - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.

### Índice de Área Foliar DJ 85/2007

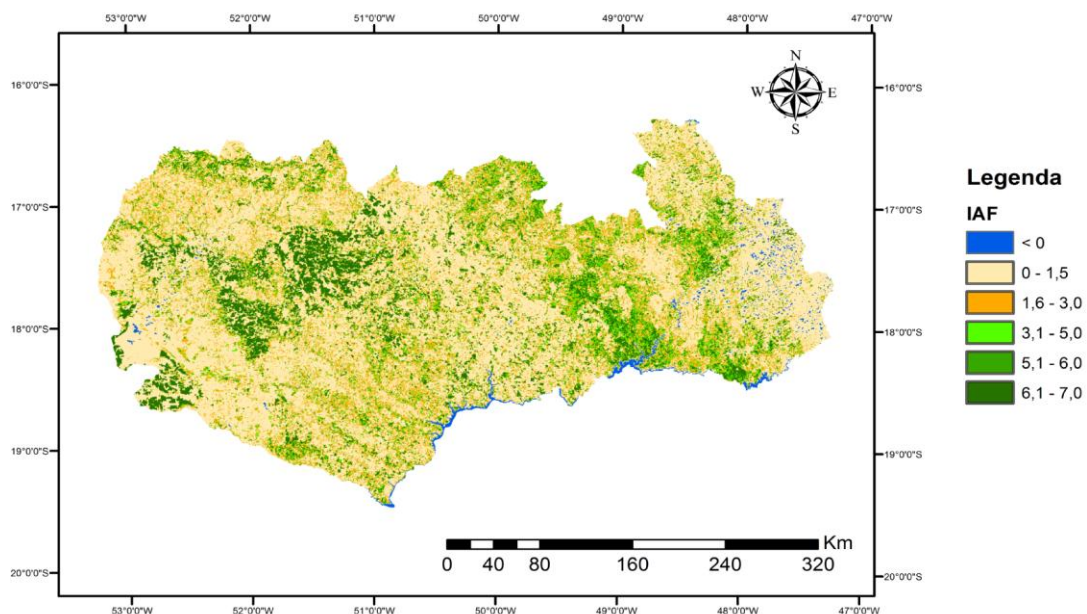


### Índice de Área Foliar DJ 114/2008

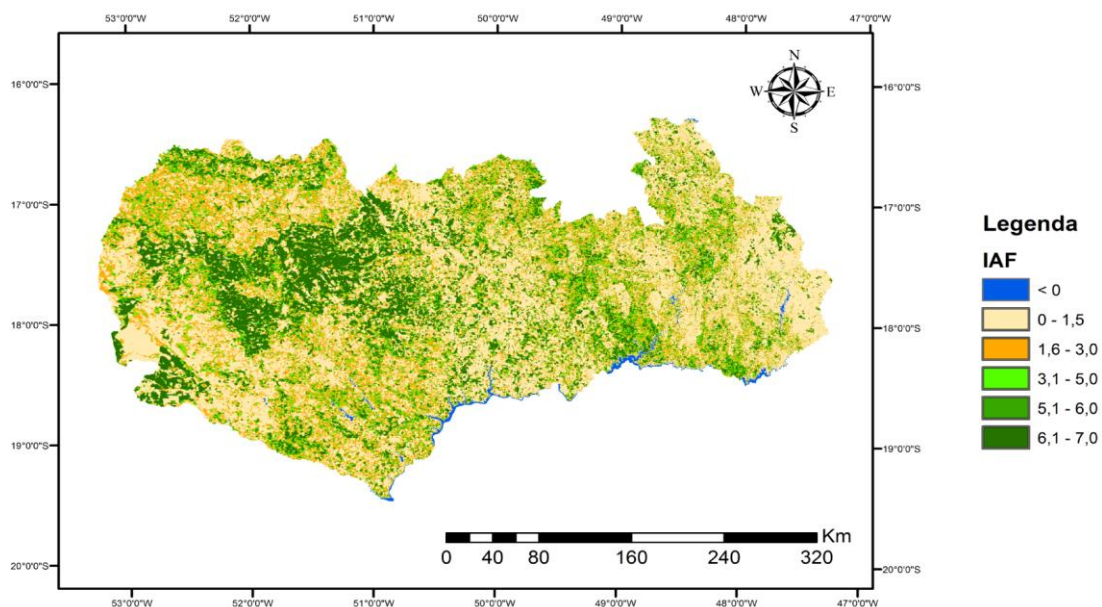


**Figura 25** - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 85/2007 e 116/2008.

### Índice de Área Foliar DJ 109/2009



### Índice de Área Foliar DJ 100/2010



**Figura 26** - Mapa de espacialização do Índice de Área Foliar (IAF) da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 109/2009 e 100/2010.

Observando os mapas da Figura 24, 25 e 26 pode-se perceber que o IAF predominante na área de estudo esteve entre os valores 0 e 3,0 nas imagens das datas julianas de 85/2007, 116/2008 e 109/2009, enquanto

algumas áreas isoladas com IAF superior a 4,0 (cor verde escuro), correspondendo, provavelmente, às áreas de vegetação nativa e cerrado nas imagens das datas julianas 114/2006 e 100/2010, nas porções noroeste da mesorregião do Sul Goiano.

## 5.2. Fluxos de radiação de superfície

### 5.2.1. Temperatura de superfície

A temperatura de superfície consiste num importante parâmetro obtido a partir da banda termal do sensor MODIS/TERRA, para o equacionamento do balanço de energia em superfície por meio do algoritmo SEBAL.

Na Tabela 9, estão apresentados os valores da temperatura de superfície das imagens processadas pelo algoritmo SEBAL e que resultaram nos mapas de temperatura de superfície. Sob um aspecto geral, toda a área da mesorregião do Sul Goiano manteve os valores entre o mínimo de 296,5°K (23,3°C) (085/2007) e o máximo de 316,4°K (43,2°C) (114/2006), com a média variando entre 298,16° K (25,0°C) e 301,31°K (28,1°C).

**Tabela 9** - Valores de temperatura de superfície (°K e °C) obtida por meio da banda termal (LST), sensor MODIS.

Temperatura de Superfície								
Data Juliana	Mínimo		Máximo		Média	Mediana	Moda	DVP
	°K	°C	°K	°C				
114/2006	299,6	26,6	313,9	40,9	299,5	301,7	301,7	28,8
85/2007	296,5	23,5	314,4	41,4	301,3	303,3	303,3	31,8
116/2008	300,6	27,6	313,8	40,2	297,7	302,8	301,6	39,6
109/2009	298,8	25,8	316,2	39,2	298,1	302,6	302,6	40,0
100/2010	298,7	25,7	312,2	39,2	298,2	301,2	301,2	30,6

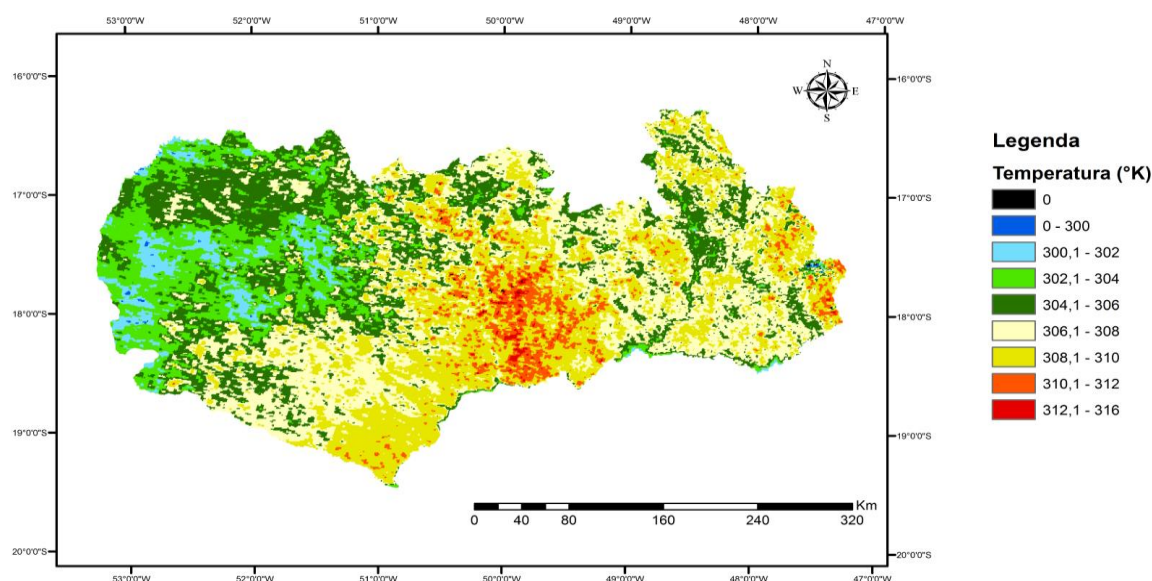
Estes dados têm suas variações espaciais e temporais representadas nos mapas das Figuras 27, 28 e 29, onde se pode observar que os valores de temperatura de superfície variaram entre 301°K e 316°K em todas as imagens



adquiridas pelo sensor MODIS/TERRA. Na porção central da mesorregião do Sul Goiano, onde predominam as áreas de cultivos agrícolas como as monoculturas da cana-de-açúcar, da soja e de outras culturas agrícolas, mantiveram os maiores valores de temperatura, em torno de 310°K, chegando até 316°K. Deve-se levar em consideração que nesta porção da área e estudo também predominam as áreas de solo exposto e pastagem o que contribui para a ocorrência de valores de temperatura mais elevados. Na porção a noroeste da cena foram observados os menores valores temperatura, geralmente, inferiores a 300°K, nas imagens dos dias 114/2006 e 100/2010. As imagens de 85/2007, 116/2008 e 109/2009, mantiveram valores acima 306,1°K em na maior parte da área de estudo sendo ainda encontrados os valores mais baixos de temperatura na porção noroeste da mesorregião do Sul Goiano.

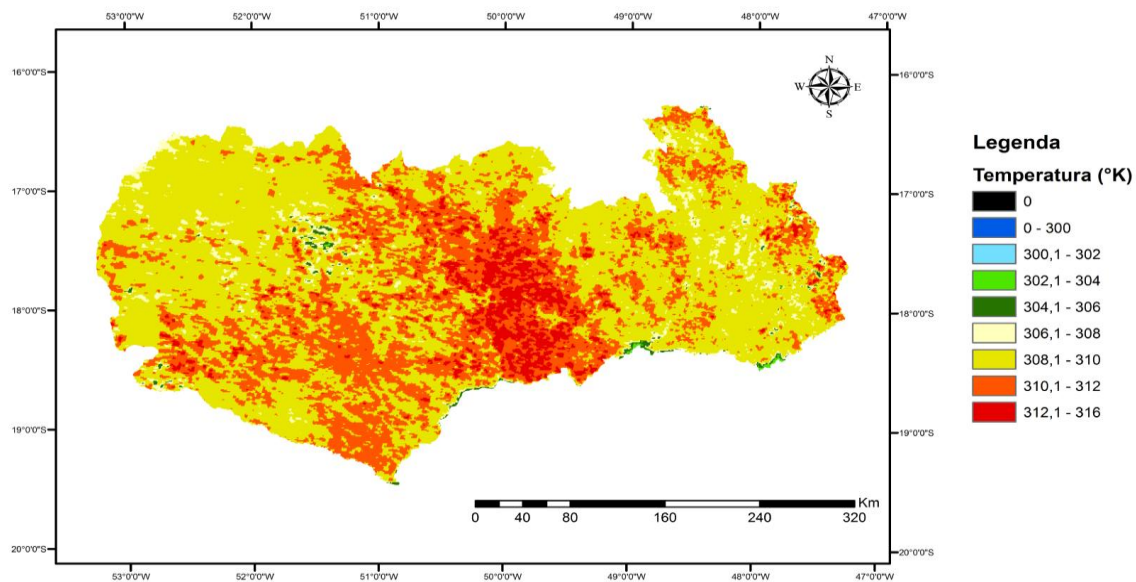
Segundo levantamento realizado por Silva, Santana e Pelegrini (2006) a mesorregião do Sul Goiano encontra-se com 1200 e 1300 horas de insolação no período chuvoso, isto é, de outubro até abril, sendo de 180 até 200 horas no mês de março e 210 até 230 no mês de abril. Estes valores podem justificar, de certa forma, as temperaturas elevadas no período em que foram escolhidas as imagens para realizar o processamento do algoritmo SEBAL.

### Temperatura de Superfície DJ 114/2006

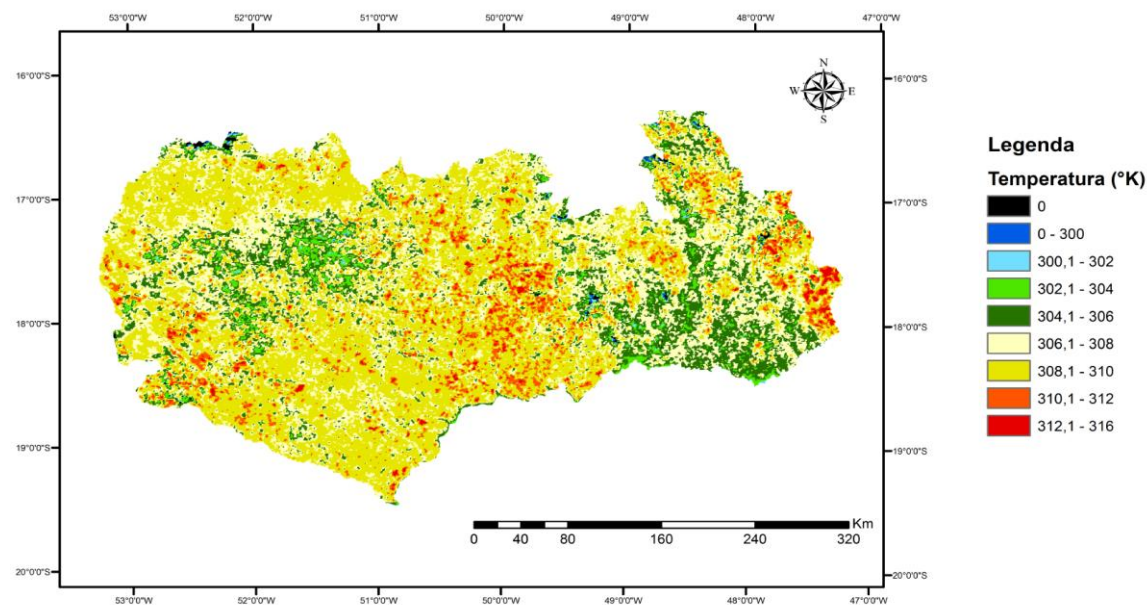


**Figura 27** - Mapa de espacialização da temperatura de superfície (Ts), em graus Kelvin, da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 114/2006.

### Temperatura de Superfície DJ 85/2007

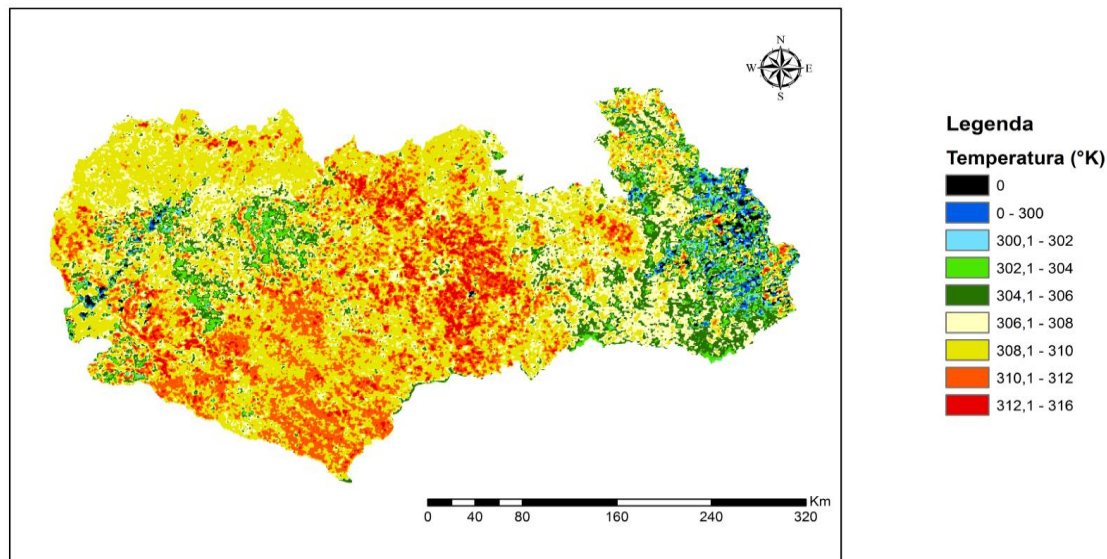


### Temperatura de Superfície DJ 116/2008

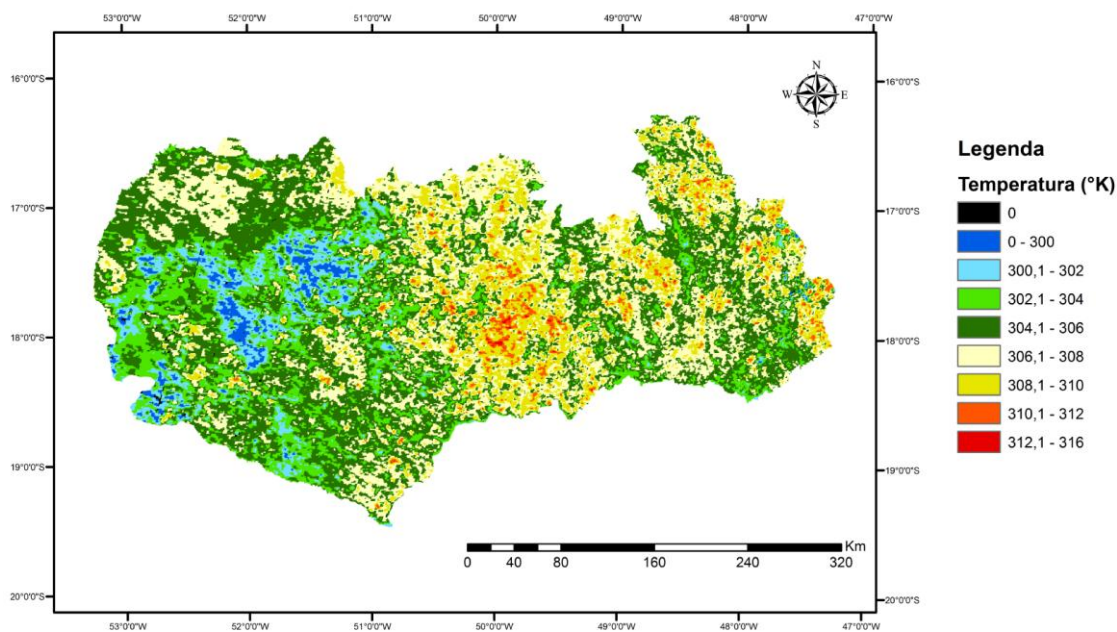


**Figura 28** - Mapas de espacialização da temperatura de superfície ( $T_s$ ), em graus Kelvin, da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 85/2007 e 116/2008.

### Temperatura de Superfície DJ 109/2009



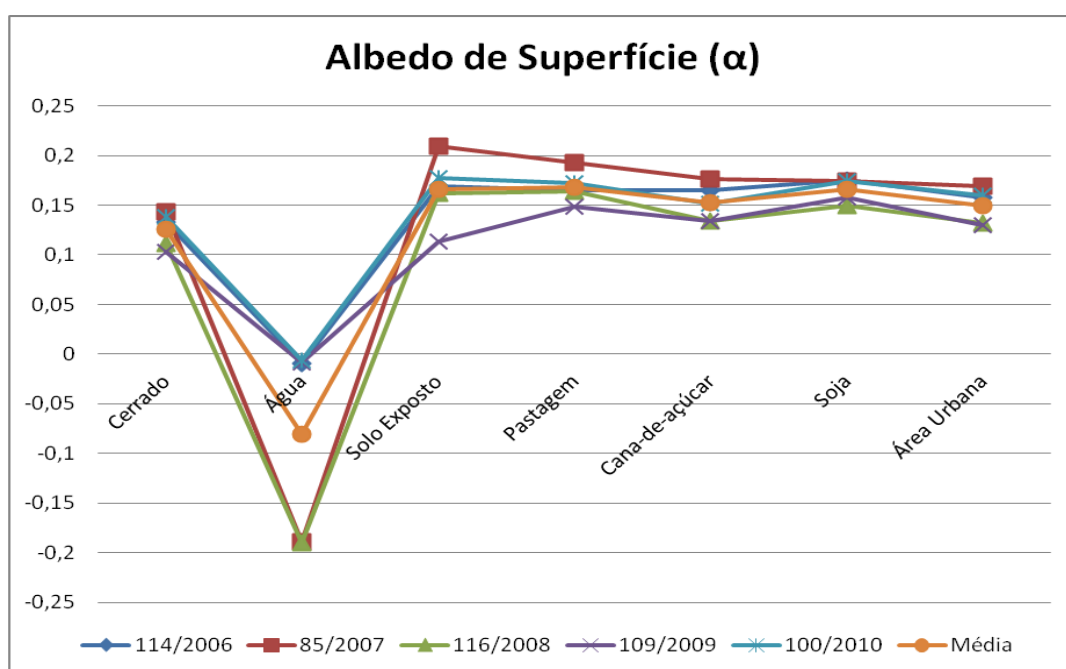
### Temperatura de Superfície DJ 100/2010



**Figura 29** - Mapas de espacialização da temperatura de superfície ( $T_s$ ) da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 109/2009 e 100/2010.

### 5.2.2. Albedo de superfície ( $\alpha$ )

Na Figura 30, podem-se observar os valores de albedo obtidos nos pontos de controles. O comportamento do albedo de superfície manteve-se coerente com o que se encontra na literatura científica, com valores baixos ou negativos nas áreas de corpos hídricos e mais elevados sobre a superfície terrestre, variando para cada diferente tipo de cobertura do solo.



**Figura 30** - Gráfico ilustrativo do comportamento dos valores do albedo de superfície dos pixels de cerrado, água, solo exposto, pastagem, cana-de-açúcar soja e área urbana para as datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

A partir das Tabelas 10 e 11 pode-se averiguar que os pixels de solo exposto apresentaram os mais elevados valores de albedo chegando até 0,209 na data juliana 85/2007 e com uma média de 0,166 no período analisado. Os pixels das áreas agrícolas com o cultivo de cana-de-açúcar e soja mantiveram respectivamente os valores de albedo médios de 0,152 e 0,166, respectivamente, enquanto nas áreas de pastagem o valor médio de albedo ficou em torno de 0,161. Os valores médios mais baixos encontrados na mesorregião do Sul Goiano foram das áreas de cerrados variando entre 0,106 (109/2009) e 0,153 (100/2010).



**Tabela 10** - Valores de albedo de superfície obtidos pelos pontos de controles na mesorregião do Sul Goiano.

DJ	Pontos de Controles						
	Cerrado	Água	Solo Exposto	Pastagem	Cana de açúcar	Soja	Área Urbana
114/2006	0,133	-0,009	0,169	0,165	0,165	0,175	0,158
85/2007	0,143	-0,189	0,209	0,193	0,176	0,174	0,169
116/2008	0,111	-0,19	0,161	0,164	0,134	0,15	0,132
109/2009	0,103	-0,008	0,113	0,148	0,134	0,158	0,130
100/2010	0,138	-0,006	0,177	0,172	0,152	0,174	0,160
<b>Média</b>	<b>0,126</b>	<b>-0,080</b>	<b>0,166</b>	<b>0,168</b>	<b>0,152</b>	<b>0,166</b>	<b>0,150</b>

**Tabela 11** - Valores médios de albedo de superfície obtidos pelos recortes de 16 pixels na mesorregião do Sul Goiano.

DJ	Valores Médios de Albedo						
	Cerrado	Água	Solo exposto	Pastagem	Cana de açúcar	Soja	Área urbana
114/2006	0,093	-0,040	0,109	0,114	0,133	0,120	0,109
85/2007	0,096	-0,083	0,165	0,122	0,146	0,125	0,115
116/2008	0,072	-0,095	0,099	0,099	0,105	0,106	0,093
109/2009	0,069	-0,005	0,074	0,093	0,104	0,102	0,089
100/2010	0,093	-0,042	0,120	0,115	0,125	0,116	0,111
<b>Média</b>	<b>0,085</b>	<b>-0,053</b>	<b>0,113</b>	<b>0,109</b>	<b>0,123</b>	<b>0,114</b>	<b>0,103</b>

Segundo Mendonça (2007) foram obtidos valores de albedos medidos com piranômetros, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro, variando de 0,23 até 0,31, enquanto valores estimados pelo algoritmo SEBAL, estiveram na faixa de 0,14 até 0,22 e valores estimados pelo sensor MODIS variaram entre 0,14 até 0,18. Pode-se notar que os valores estimados pelo algoritmo SEBAL e pelo sensor MODIS são subestimados em relação àqueles medidos em campo. Os valores de albedo estimados por Gomes (2009) variaram de 0,09 até 0,13 em áreas de cerrado e 0,16 até 0,20 em áreas com plantio de cana-de-açúcar. Através de aplicações do algoritmo SEBAL, com imagens Landsat TM5, Giongo et al.

(2010) encontraram valores médios de albedo entre 0,12 e 0,15 numa área com superfície hídrica, cerrado e cana-de-açúcar.

Comparando os valores estimados com os dos referidos autores, pode-se constatar que o albedo de superfície manteve coerência entre os valores estimados a partir do algoritmo SEBAL, concernentes às áreas de cana-de-açúcar.

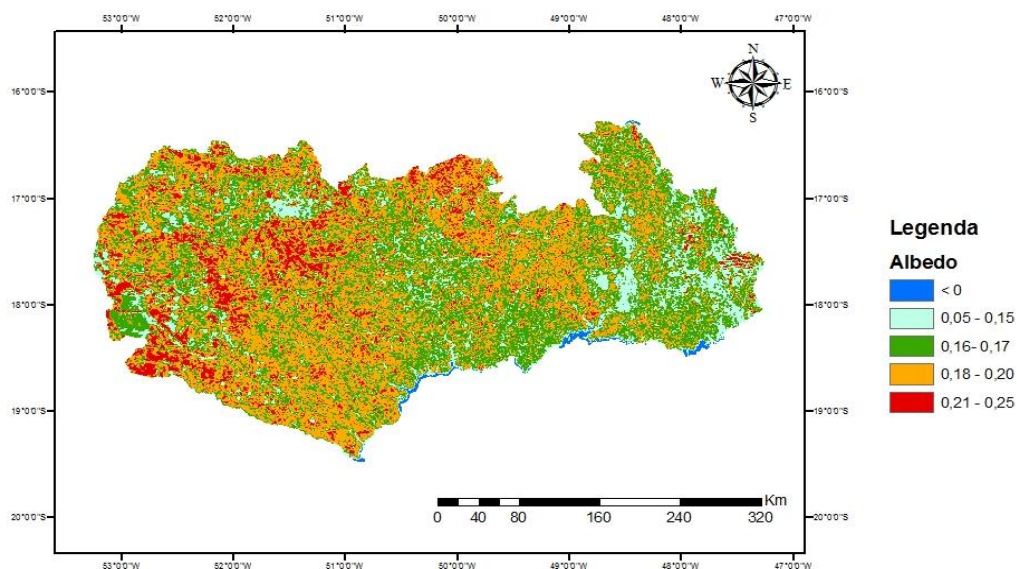
Através da Tabela 12 e dos mapas representados nas Figuras 31, 32 e 33 pode-se observar, sob um aspecto geral, uma variação do albedo instantâneo de superfície na mesorregião do Sul Goiano de 0 até 0,25 em todas as imagens, com valores médios predominantes em torno de 0,13 nas imagens das datas julianas 114/2006, 85/2007, 0,17 no dia juliano 116/2008 e 0,16 nas imagens das datas julianas de 109/2009 e 100/2010.

**Tabela 12** - Valores dos parâmetros obtidos na análise estatística dos mapas de albedo de superfície gerados pelo produto MODIS.

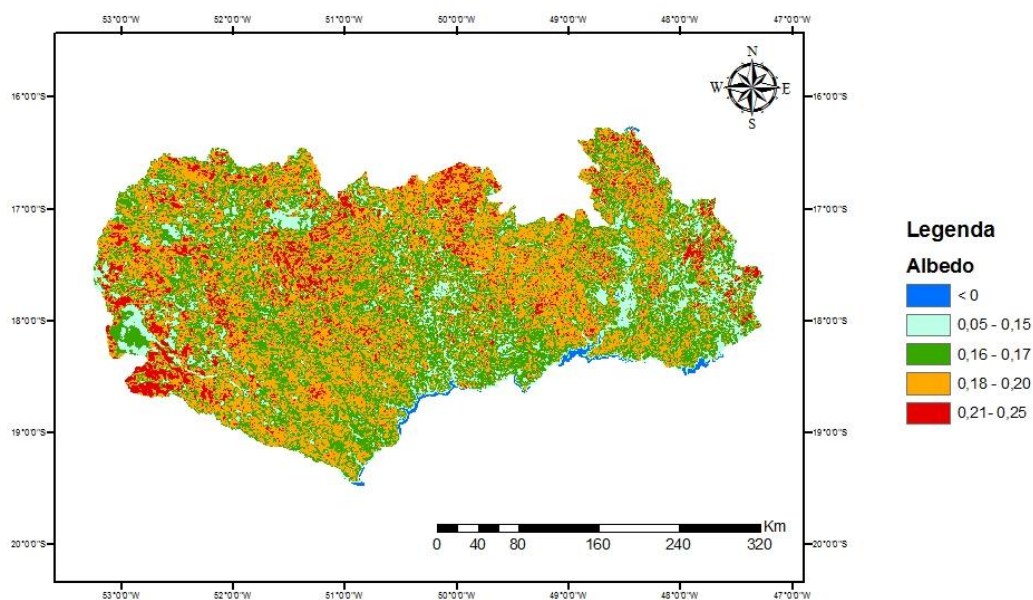
<b>Albedo de Superfície (<math>\alpha</math>)</b>			
<b>Data</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Médio</b>
114/2006	0	0,25	0,13
85/2007	0	0,25	0,13
116/2008	0	0,25	0,17
109/2009	0	0,25	0,16
100/2010	0	0,25	0,16

Na espacialização dos valores do albedo das superfícies das datas 114/2006, 85/2007 pode-se observar que houve predomínio das áreas com valores de albedo entre 0,16 e 0,25 (verde escuro, coral e vermelho). Nas imagens dos dias 116/2008 e 109/2009 o valor do albedo variou entre 0,05 e 0,17 (azul claro, verde escuro e coral) e na imagem do dia 100/2010 o albedo predominou entre 0,16 e 0,20 (verde escuro e coral).

### Albedo de superfície DJ 114/2006

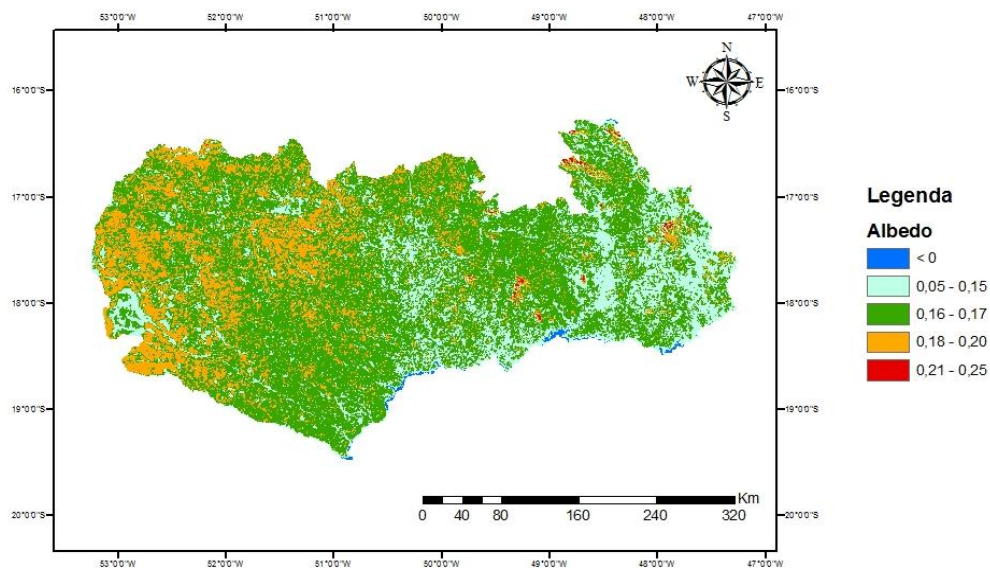


### Albedo de superfície DJ 85/2007

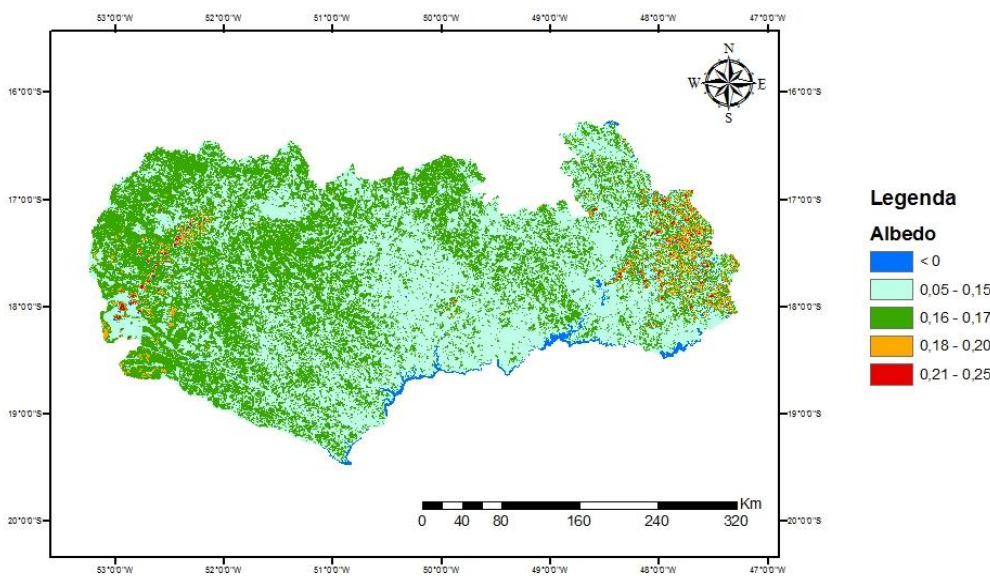


**Figura 31** - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 114/2006 e 85/2007.

### Albedo de superfície DJ 116/2008

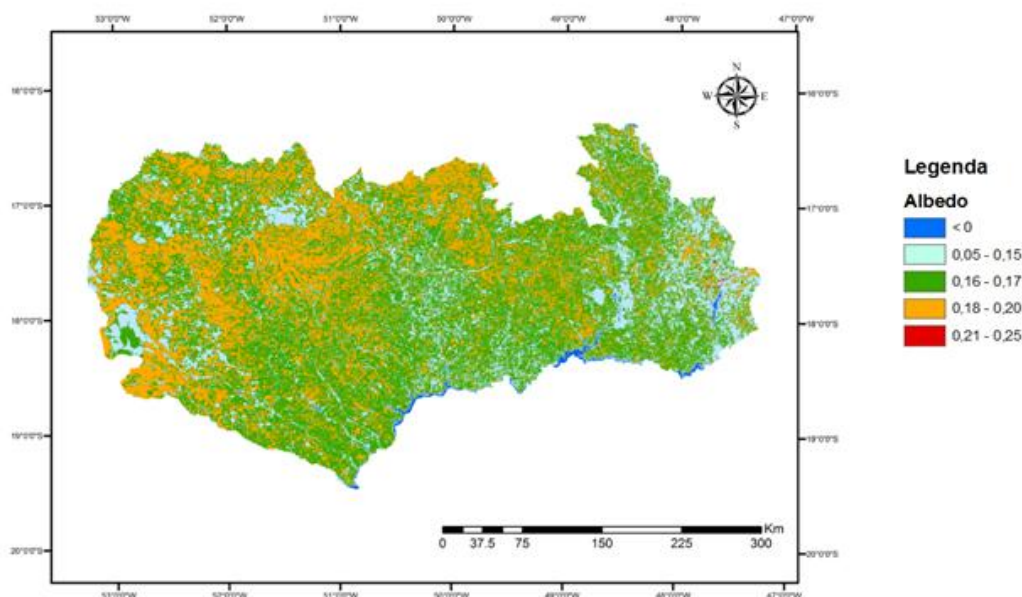


### Albedo de superfície DJ 109/2009



**Figura 32** - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – datas julianas 116/2008 e 109/2009.

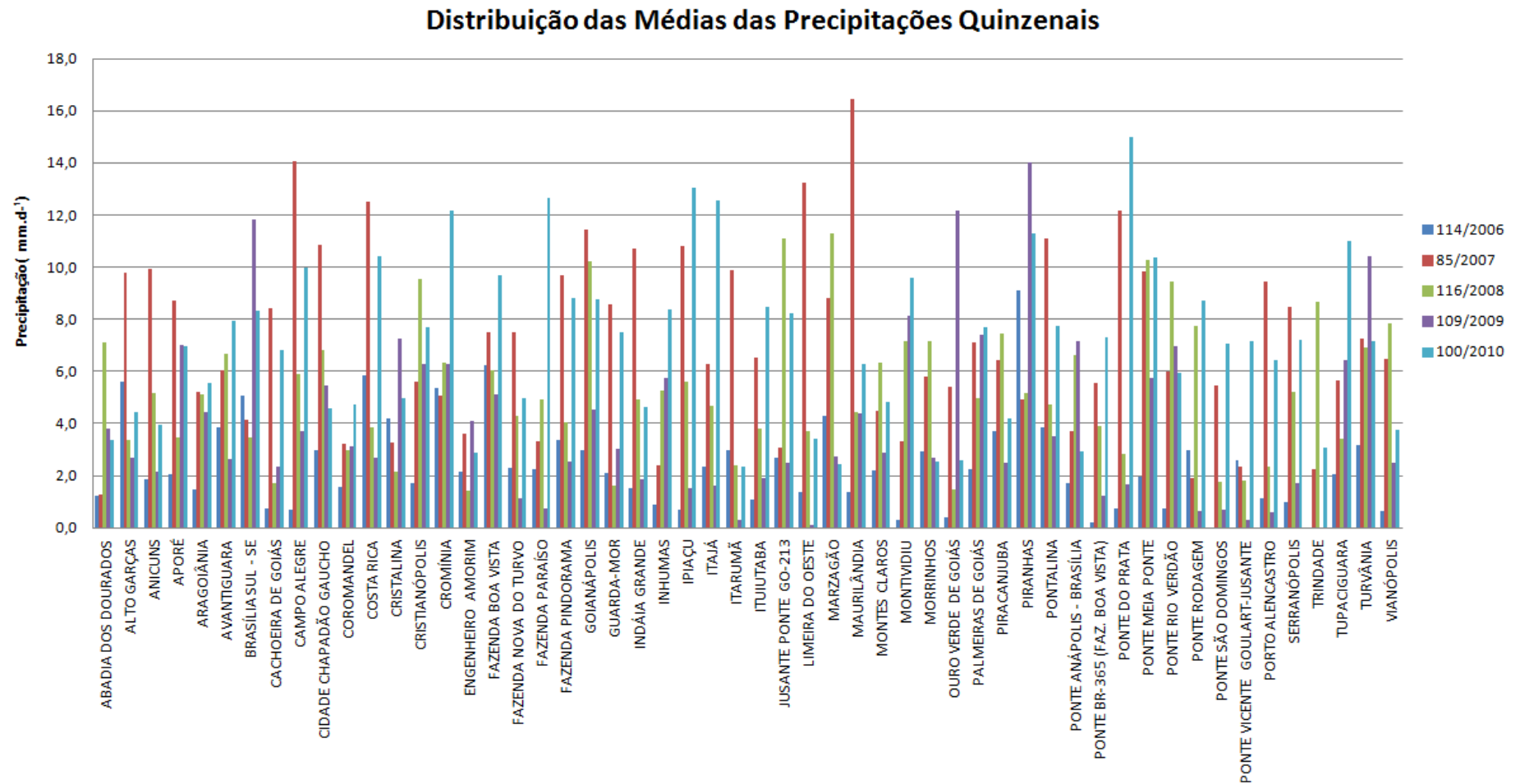
### Albedo de superfície DJ 100/2010



**Figura 33** - Mapas de espacialização do albedo de superfície da mesorregião do Sul Goiano – data juliana 100/2010.

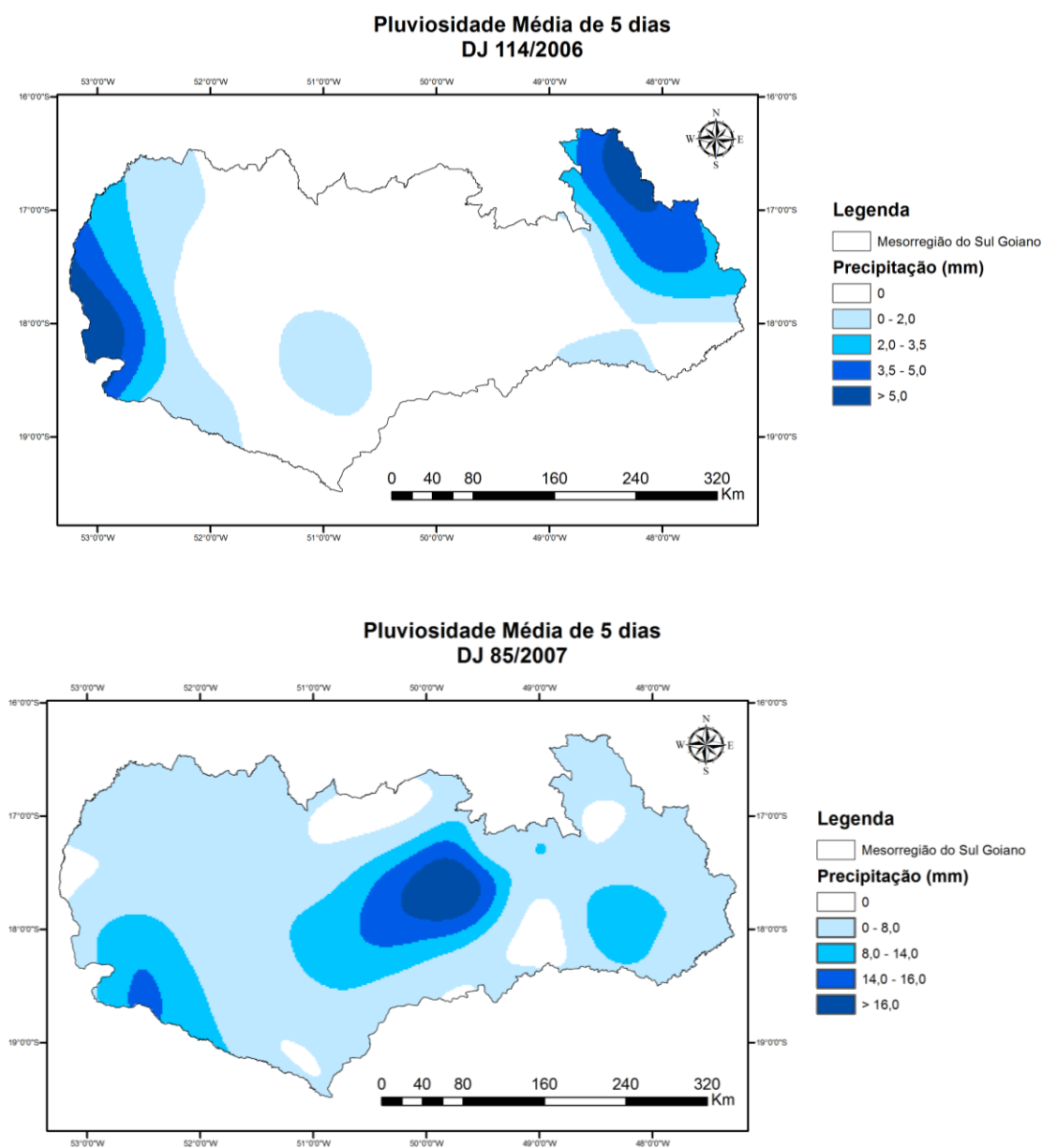
O quantitativo de precipitação é um fator que influencia diretamente o albedo de superfície, uma vez que os solos úmidos geralmente apresentam índices de albedo mais baixos, devido ao escurecimento de seus horizontes superiores. Em áreas onde existe pouca umidade na superfície do solo, são comuns os índices de albedos mais elevados.

Para os quinze dias anteriores a passagem do sensor foram encontrados valores médios totais de chuva na faixa de 0 mm até 16 mm na estação de Maurilândia no ano de 2007, como pode ser observado na Figura 34 e no ANEXO I. Os valores medidos pelas 54 estações, conforme apresentado na Figura 34, pouco ultrapassaram os 4 mm na mesorregião do Sul Goiano, ficando abaixo dos 18,0 mm. Os períodos quinzenais mais úmidos foram dos anos de 2007 e 2010, com valores médios totais, respectivos de 383 mm e 380,3 mm para toda a área de estudo. O ano de 2006 apresentou a quinzena menos úmida com valor total médio de 128,3 mm e os anos de 2008 e 2009 teve valores totais médios de 286,5 mm e 214,6 mm.



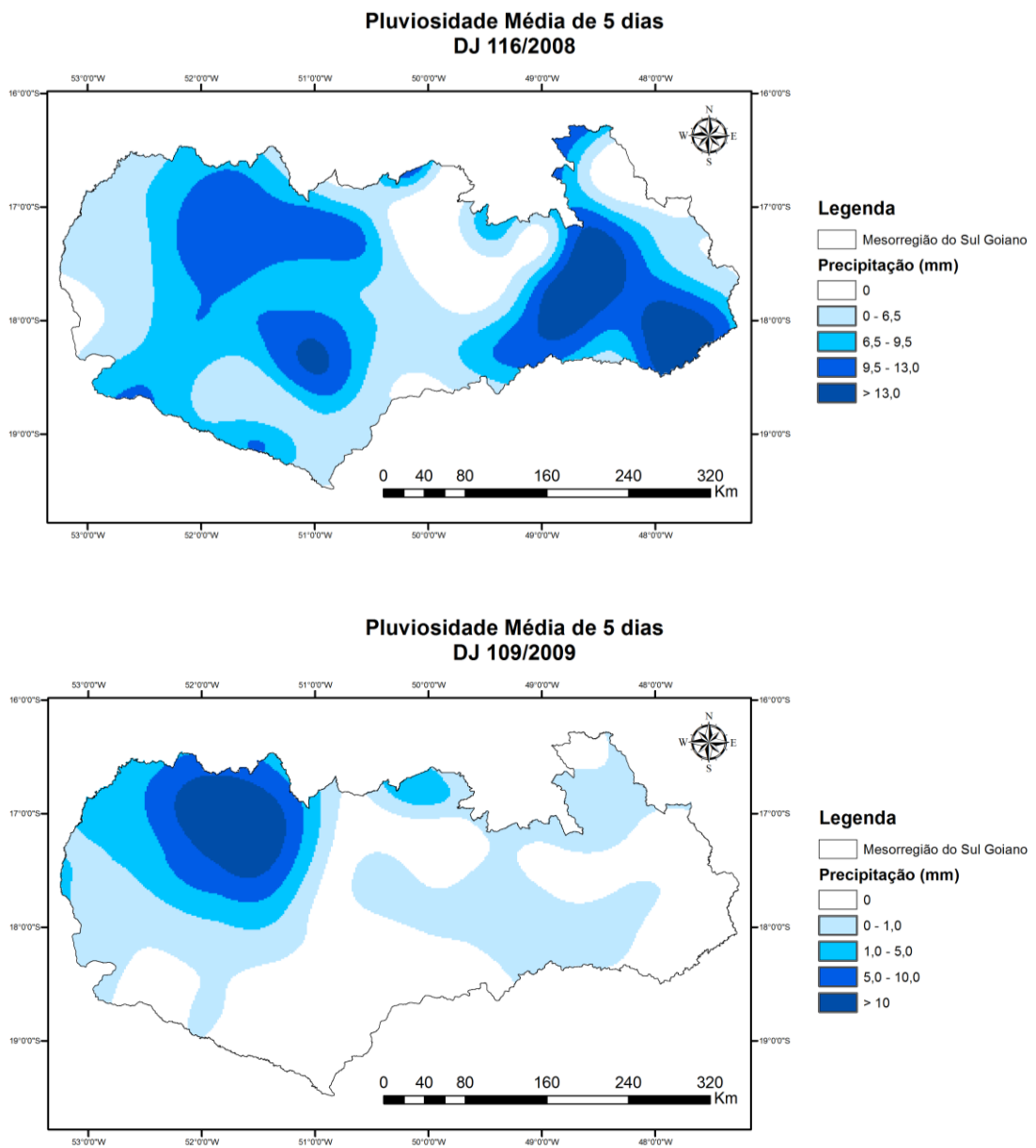
**Figura 34** - Gráfico ilustrativo dos valores médios de precipitação obtidos nas estações pluviométricas na mesorregião do Sul Goiano para os quinze dias anteriores às datas julianas de 114/2006, 85/2007, 116/2008, 109/2009 e 100/2010.

A partir dos dados de precipitação média foram selecionados os valores dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA e espacializados, conforme os mapas das Figuras 35, 36 e 37. Através destes mapas podemos compreender melhor a distribuição das chuvas pelo espaço da mesorregião do Sul Goiano.



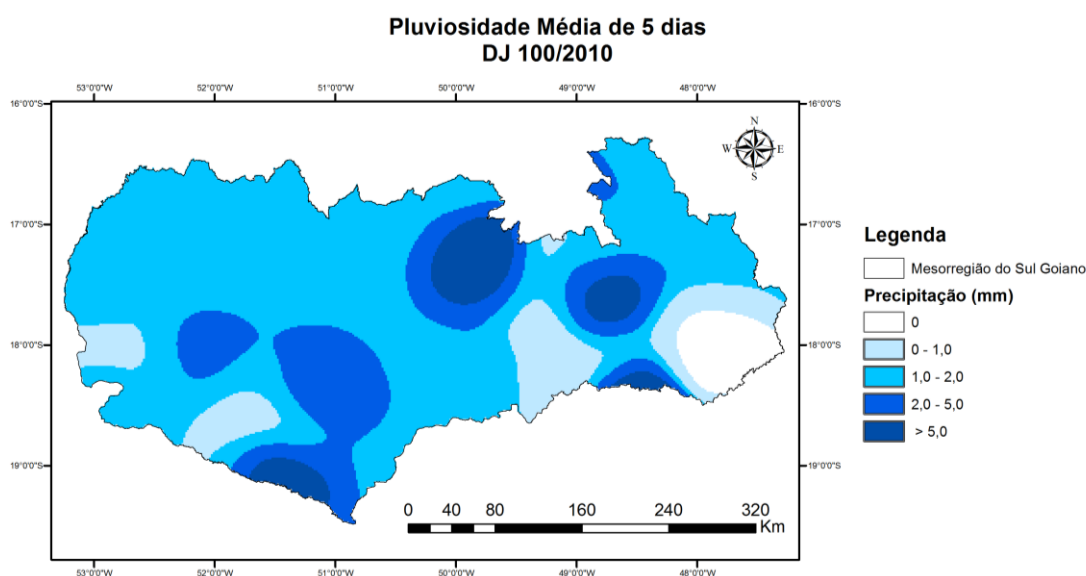
**Figura 35** - Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para as datas julianas 114/2006 e 85/2007.





**Figura 36** - Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para as datas julianas 116/2008 e 109/2010.



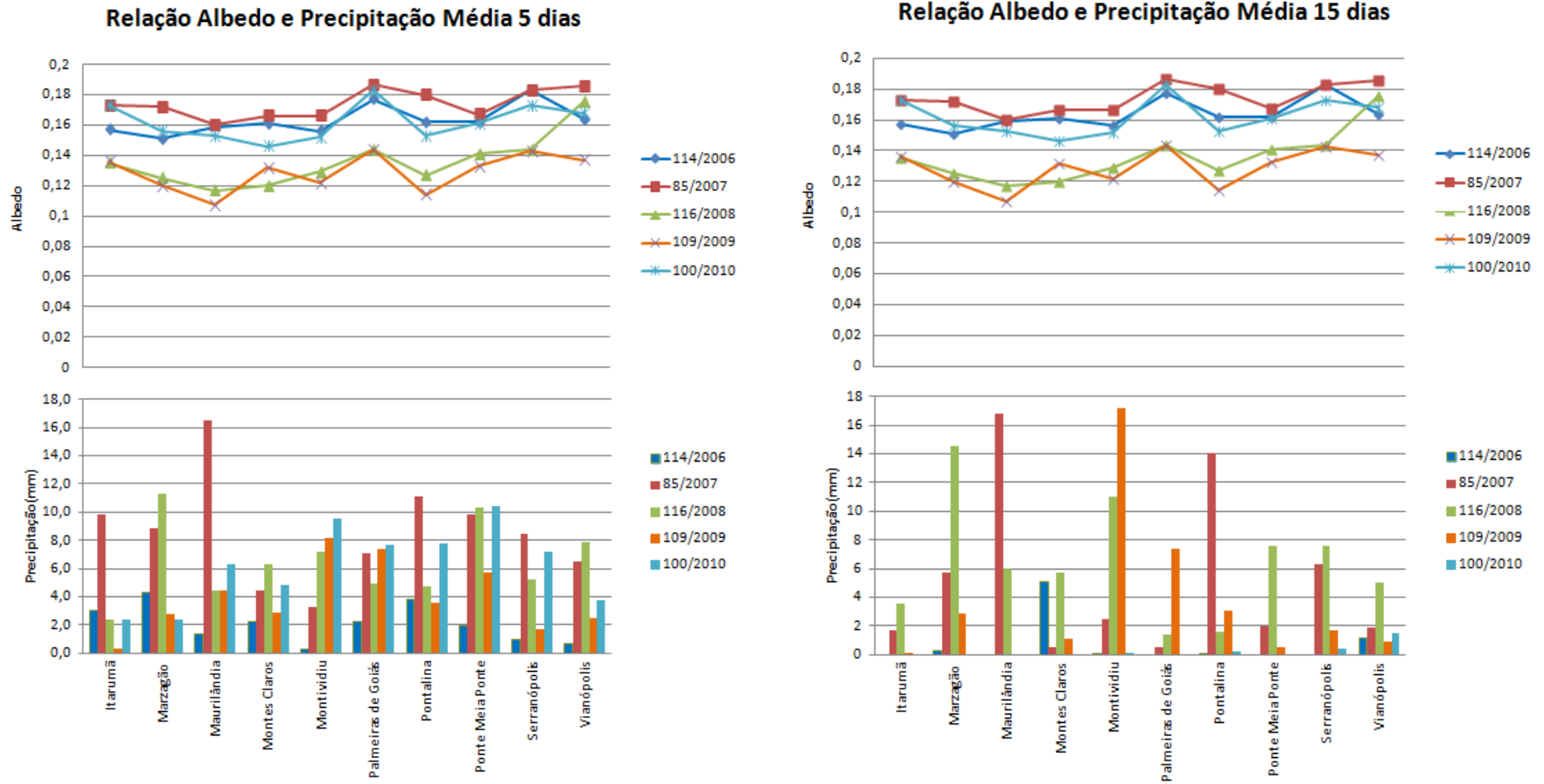


**Figura 37-** Mapas da espacialização das médias pluviométricas dos cinco dias anteriores à passagem do sensor MODIS/TERRA para o dia Juliano 100/2010.

Sob um aspecto geral, as chuvas estiveram bem distribuídas pela área de estudo nos cinco dias anteriores as datas julianas 85/2007, 116/2008 e 100/2010. As datas referentes à 85/2007, 116/2008 e 109/2009 foram os mais úmidos mantendo valores médios de precipitação que ultrapassaram os 16 mm. As porções, central e sudoeste da mesorregião do Sul Goiano, apresentaram as manchas de precipitação com os maiores valores médios, no entanto, deve-se destacar que as maiores concentrações de estações pluviométricas estão localizadas nestas áreas.

Segundo Assad e Sano (1998), utilizando modelo numérico de terreno para espacializar dados pluviométricos na região de domínio do Cerrado brasileiro, encontraram médias mensais para região do Sul do Estado de Goiás, variando entre 50 mm até 100mm para os meses de fevereiro e março, sendo comum a diminuição dos valores pluviométricos para os meses seguintes. Os valores médios mensais de precipitação encontrados por Silva, Santana e Pelegrini (2006), para o todo o sul do estado de Goiás no mês de março variaram entre 100 mm e 250 mm, enquanto os meses de abril mantiveram os valores de precipitação entre 50 mm e 175 mm.

Nos gráficos da Figura 38 estão representados os valores de precipitação média para os quinze dias e para os cinco dias anteriores a passagem do sensor MODIS/TERRA, de forma comparada com os gráficos de albedo de superfície estimado pelo algoritmo SEBAL.



**Figura 38** - Gráficos ilustrativos da relação entre valores pluviométricos médios e os valores de albedo de superfície coletados nos pixels de dez estações pluviométricas na mesorregião do Sul Goiano.

Foram selecionadas dez estações pluviométricas instaladas na mesorregião do Sul Goiano para realizar uma comparação entre os valores de precipitação média e os valores de albedo de superfície obtidos nos pixels onde se localizam as estações são elas: Itarumã, Marzagão, Maurilândia, Montes Claros, Montividiu, Palmeiras de Goiás, Pontalina, Ponte Meia Ponte, Serranópolis e Vianópolis. Estas estações estão bem distribuídas ao longo da área de estudo e apresentam valores médios de precipitação variando de 0 (zero) até o máximo de 16,8 mm obtido na estação de Maurilândia no dia juliano 85/2007.

Analisando a Figura 38 pode-se constatar que os valores médios de precipitação para cinco dias anteriores à passagem do sensor influenciaram diretamente no albedo de superfície. A estação Maurilândia apresentou o mais elevado valor de pluviométrico médio em 85/2007, chegando a 16,8 mm tendo um albedo correspondente 0,160 enquanto a estação Palmeira de Goiás foi registrado um valor de 7,1 mm correspondendo a um albedo de 0,187.