UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E DA INFORMAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO EM GEOGRAFIA

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁREAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DO BRASIL

ANDERSSON RODRIGUES PETER

Rio Grande, 2014

ANDERSSON RODRIGUES PETER

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁREAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DO BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de Pesquisa: Análise dos sistemas naturais e ambientais

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luis Ruhoff

Rio Grande, 2014

Banca examinadora

Prof. Dr. Anderson Luis Ruhoff
Instituto de Ciências Humanas e da Informação
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Centro de Filosofia e Ciências Humanas
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Moisés Ortemar Rehbein
Instituto de Ciências Humanas
Universidade Federal de Pelotas

Dedicatória

Aos meus pais Adalberto e Albertina por me criarem da melhor forma possível e por me apoiarem em todas as minhas escolhas, aos meus irmãos pelo companheirismo diário e conselhos, e a minha namorada Clarissa minha companheira e incentivadora e por estar comigo em todos os momentos, principalmente nos quais eu mais precisei. Essa conquista é nossa! Amo vocês.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, ao professor Anderson, pois além de me orientar acreditou que eu conseguiria realizar o trabalho em tão pouco tempo, mesmo não tendo nenhuma base sobre o assunto.

Aos meus colegas de mestrado que de alguma forma participaram dessa caminhada, seja com o intercâmbio de informações ou socorrendo-me nas atividades sugeridas em aula. Em particular ao colega de laboratório Ricardo por me auxiliar na compreensão e revisão das equações do SEBAL.

Aos membros da banca professores Bernardo e Moisés pelas contribuições sugeridas. A professora Erika, que apesar de não ter participado da banca sempre está comigo me auxiliando e ajudando nas pesquisas.

Ao pessoal do Laboratório de Agrometeorologia da Embrapa Clima Temperado, em especial ao Ivan pela oportunidade de estagiar na unidade e pela troca de informações e conhecimento. Aos demais pesquisadores, assistentes, funcionários e bolsistas que me ajudaram direta ou indiretamente com suas experiências.

Ao Renato Popov, ao professor Lacê e a professora Débora por forneceram os dados das torres micrometeorológicas.

À CAPES pelo auxílio financeiro sem o qual não poderia me dedicar em tempo integral na execução do trabalho.

A todos que de alguma forma me ajudaram na elaboração desse trabalho e me apoiaram durante esses anos, meus sinceros agradecimentos.

Sumário

Banca examinadora ..... **iii**

Dedicatória ..... **iv**

Agradecimentos ..... **v**

Sumário ..... **vi**

Lista de figuras ..... **viii**

Lista de quadros ..... **x**

Lista de símbolos ..... **xii**

Lista de abreviaturas e siglas ..... **xv**

Resumo ..... **xvi**

Abstract ..... **xvii**

1. Introdução **1**

2. Revisão bibliográfica **4**

2.1. Irrigação e seus impactos hidrológicos **4**

2.2. Evapotranspiração **6**

2.2.1. Conceitos **8**

2.2.2. Métodos de estimativa **9**

2.2.2.1. Convencionais **9**

2.2.2.2. Sensoriamento remoto **12**

3. Áreas de estudo **14**

4. Procedimentos metodológicos **18**

4.1. Materiais **18**

4.2. Métodos **21**

4.2.1. Algoritmo *SEBAL/METRIC* **21**

4.2.2. Classificação do uso e cobertura da terra **30**

5. Resultados e discussão **34**

5.1. Validação dos resultados 34

5.2. Áreas de clima Tropical 36

5.2.1. Uso e cobertura da terra 36

5.2.2. Balanço de energia 41

5.2.3. Análise da evapotranspiração 44

5.3. Áreas de clima Subtropical 53

5.3.1. Uso e cobertura da terra 53

5.3.2. Balanço de energia 57

5.3.3. Análise da evapotranspiração 61

6. Conclusões e considerações finais 71

Referências 73

Apêndices 80

Lista de figuras

Figura 2.1.1. Diferentes métodos de irrigação. A) Intermitente por meio de pivô central; B) Contínua por inundação da superfície. 5

Figura 2.2.1. O processo de fotossíntese e transpiração da planta. 7

Figura 2.2.2. Mecanismos que governam o processo de ET. 7

Figura 3.1. Mapa de localização das áreas de estudo selecionadas. 14

Figura 3.2. Normais climatológicas do acumulado médio da precipitação pluviométrica e das temperaturas mínimas e máximas. A) Barreiras-BA; B) Brasília-DF; C) Paracatu-MG. 15

Figura 3.3. Normais climatológicas do acumulado médio da precipitação pluviométrica e das temperaturas mínimas e máximas. A) Alegrete; B) Cachoeira do Sul; C) Santa Vitória do Palmar.....17

Figura 4.2.1.1. Fluxograma do processo de estabilização dos valores para cada pixel na imagem.....29

Figura 5.1.1. Comparativo entre o comportamento das variáveis do BE nas torres micrometeorológicas de Brasília (A) e Paraíso do Sul (B) nos dias correspondentes a aquisição da imagem. 34

Figura 5.2.1.1. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Bahia em 27 de junho de 2001. 38

Figura 5.2.1.2. Mapa de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília em 08 de julho de 2011.....38

Figura 5.2.1.3. Mapa de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais em 29 de julho de 2001.....39

Figura 5.2.3.1. Diagrama de caixa da ETd em diferentes classes de uso e cobertura da terra nas áreas analisadas. A) Bahia; B) Goiás/Brasília; C) Minas Gerais. 46

Figura 5.2.3.2. Mapa da ETd na área da Bahia em 27 de junho de 2001. 48

Figura 5.2.3.3. Mapa da ETd na área de Goiás/Brasília em 08 de julho de 2011. 49

Figura 5.2.3.4. Mapa da ETd na área de Minas Gerais em 29 de julho de 2001. 51

Figura 5.2.3.5. Na coluna da esquerda composição colorida falsa-cor 5(R)G(4)B(3). Na coluna central FE. Na coluna da direita ETd. A) Bahia; B) Goiás/Brasília; C) Minas Gerais. 52

Figura 5.3.1.1. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste em 31 de janeiro de 2004.....54

Figura 5.3.1.2. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Região Central em 18 de fevereiro de 2004. 54

Figura 5.3.1.3. Mapa de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul em 31 de dezembro de 2000. 55

Figura 5.3.3.1. Diagrama de caixa da ETd em diferentes classes de uso e cobertura da terra nas áreas analisadas. A) Fronteira Oeste; B) Região Central; C) Extremo Sul. 63

Figura 5.3.3.2. Mapa da ETd na área da Fronteira Oeste em 31 de janeiro de 2004. 66

Figura 5.3.3.3. Mapa da ETd na área da Região Central em 18 de fevereiro de 2004. 67

Figura 5.3.3.4. Mapa da ETd na área do Extremo Sul em 31 de dezembro de 2000.... 68

Figura 5.3.3.5. Na coluna da esquerda composição colorida falsa-cor 5(R)G(4)B(3). Na coluna central FE. Na coluna da direita ETd. A) Fronteira Oeste; B) Região Central; C) Extremo Sul. 70

Lista de quadros

Quadro 3.1. Calendário agrícola da soja irrigada no Nordeste e Centro-oeste do Brasil 15

Quadro 3.2. Calendário agrícola do arroz no Estado do RS 16

Quadro 4.1.1. Informações das imagens utilizadas.....18

Quadro 4.1.2. Quantidade de chuva (mm) nos quinze dias antecedentes à aquisição da imagem.....19

Quadro 4.1.3. Caracterização e descrição dos instrumentos instalados no sítio micrometeorológico de Brasília 19

Quadro 4.1.4. Caracterização e descrição dos instrumentos instalados no sítio micrometeorológico de Paraíso do Sul (Região Central do RS).....20

Quadro 4.2.1.1. Localização e valores dos pixels âncoras selecionados.....26

Quadro 4.2.2.1. Classes de uso e cobertura da terra comuns aos diferentes tipos climáticos, bem como, suas características 32

Quadro 4.2.2.2. Classes de uso e cobertura da terra presentes somente nas áreas de clima tropical e suas características.....32

Quadro 4.2.2.3. Classes de uso e cobertura da terra presentes somente nas áreas de clima subtropical e suas características 32

Quadro 5.1.1. Estimativas, valores observados e resultados da validação das variáveis do BE e ET na torre micrometeorológica de Brasília.....35

Quadro 5.1.2. Estimativas, valores observados e resultados da validação das variáveis do BE e ET na torre micrometeorológica de Paraíso do Sul 35

Quadro 5.2.1.1. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Bahia.....40

Quadro 5.2.1.2. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília.....40

Quadro 5.2.1.3. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais.....40

Quadro 5.2.2.1. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Bahia.....41

Quadro 5.2.2.2. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília.....41

Quadro 5.2.2.3. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais.....41

Quadro 5.2.3.1. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Bahia.....44

Quadro 5.2.3.2. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília.....44

Quadro 5.2.3.3. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais.....45

Quadro 5.3.1.1. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste (RS).....56

Quadro 5.3.1.2. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Região Central (RS).....56

Quadro 5.3.1.3. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul (RS).....56

Quadro 5.3.2.1. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste.....57

Quadro 5.3.2.2. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Região Central.....58

Quadro 5.3.2.3. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul.....58

Quadro 5.3.3.1. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste.....61

Quadro 5.3.3.2. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Região Central.....61

Quadro 5.3.3.3. Dados estatísticos da ETd (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul.....62

Lista de símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
a e b	Coeficientes de ajuste do gradiente de temperatura	–
a	Coeficiente de regressão entre o saldo de radiação de onda longa e a transmissividade atmosférica média diária	–
AC	Ascensão capilar	mm
c	Fluxo escalar	–
C	Coeficientes derivados do modelo de transferência radiativa	–
C_i	Matriz de covariância	–
CO_2	Fluxo de gás carbônico	–
c_p	Calor específico do ar à pressão constante	$J\ kg^{-1}\ k^{-1}$
D	Distância de Mahalanobis	–
DG	Desempenho geral	–
DP	Elementos da diagonal principal	–
DP	Percolação profunda	mm
d_r	Quadrado da distância relativa Terra-Sol	–
dT	Gradiente de temperatura	$°K$, $°C$
ε_a	Emissividade atmosférica	–
EA	Erro Absoluto	–
e_a	Pressão parcial de vapor d'água atmosférico	$°K\ Pa$
ε_o	Emissividade na faixa ampla do espectro térmico	–
ε_{NB}	Emissividade na faixa estreita do espectro térmico	–
ER	Erro Relativo	–
$ESUN_{\lambda i}$	Medida exo-atmosférica para cada banda no topo da atmosfera	$W\ m^{-2}\mu m^{-1}$
ET	Evapotranspiração	mm
ET_c	Evapotranspiração da Cultura sob condições padrão	mm
$ET_{c\ adj}$	Evapotranspiração da Cultura sob condições não padrão	mm
ETR	Evapotranspiração Real	mm
ET_d	Evapotranspiração Diária	mm
ET_h	Evapotranspiração Horária	mm
ET_0, ET_r	Evapotranspiração de Referência	mm
F_v	Densidade do fluxo vertical	$W\ m^{-2}$
FE	Fração Evaporativa	–
g	Módulo do campo gravitacional terrestre	$m\ s^{-2}$
G	Fluxo de calor no solo	$W\ m^{-2}$
h	Altura média da vegetação	m
H	Fluxo de calor sensível	$W\ m^{-2}$
HR	Umidade relativa do ar	–
K	Coeficiente Kappa	–
K	Constante de Von Karman	–
Kc	Coeficiente da Cultura	–
K_1e K_2	Constantes de radiação específicas da banda do termal	–
Kt	Turbidez atmosférica	–
L	Comprimento de Monin-Obukhov	m

Símbolo	Descrição	Unidade
m_i, m_j	Vetor média das classes i e j	$-$
IAF	Índice de Área Foliar	$m^2\ m^{-2}$
$IVAS$	Índice de Vegetação ao Ajuste do Solo	$-$
$IVDN$	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	$-$
LE	Fluxo de calor latente	$W\ m^{-2}$
$LMAX_\lambda$	Coeficiente de calibração espectral máximo para cada banda	$W\ m^{-2}\mu m^{-1}$
$LMIN_\lambda$	Coeficiente de calibração espectral mínimo para cada banda	$W\ m^{-2}\mu m^{-1}$
L_v	Calor latente de vaporização	$J\ Kg^{-1}$
L_λ	Radiância espectral	$W\ m^{-2}\mu m^{-1}$
ρ	Densidade do ar	$Kg\ m^{-3}$
P	Precipitação	mm
P	Pressão atmosférica	$K\ Pa$
p_c	Variação da densidade do escalar	$-$
Q	Percentual dos acertos ocorridos ao acaso	$-$
Q_{cal}	Imagem digital	ND
Q_{calmax}	Intensidade máxima do pixel	ND
Q_{calmin}	Intensidade mínima do pixel	ND
q'	Flutuação da umidade específica do ar	kg^{-1}
r_{ah}	Resistência aerodinâmica	$m\ s^{-1}$
Rn	Saldo de radiação	$W\ m^{-2}$
Rn_{24h}	Saldo de radiação diário	$W\ m^{-2}$
RO	Escoamento superficial	$m^3\ s^{-1}$
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida	$W\ m^{-2}$
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente	$W\ m^{-2}$
$R_{S\downarrow}$	Radiação de onda curta incidente	$W\ m^{-2}$
R_{s24h}	Radiação global diária	$W\ m^{-2}$
$R_{s24h\ toa}$	Radiação global diária no topo da atmosfera	$W\ m^{-2}$
S	Constante solar	$W\ m^{-2}$
T	Matriz transposta	$-$
T	Número total de amostras	$-$
T'	Componente turbulenta do ar	$°K$, $°C$
Tar	Temperatura média do ar	$°K$, $°C$
T_s	Temperatura de superfície	$°K$, $°C$
W	Água precipitável na atmosfera ou vapor d'água	mm
w	Velocidade vertical do vento	$m\ s^{-1}$
u_{100}	Velocidade do vento a 100m	$m\ s^{-1}$
u_x	Velocidade do vento	$m\ s^{-1}$
u_*	Velocidade de fricção	$m\ s^{-1}$
X	Região analisada	$-$
X_{i+}	Quantidade total das amostras na linha e na coluna correspondente a categoria informacional;	$-$
z	Altitude	m
Z	Ângulo zenital solar	rad
z_1 e z_2	Níveis de altura acima da superfície do solo	m

Símbolo	Descrição	Unidade
Z_x	Altura em que os dados de velocidade do vento foram medidos	m
z_{0m}	Coeficiente de rugosidade	m
α_s	Albedo corrigido aos efeitos atmosféricos	$-$
Δ	Taxa de variação da pressão de saturação do vapor d'água	$k\ Pa\ °C^{-1}$
ΔA	Variação do armazenamento de água	mm
Δe	Gradiente vertical de temperatura	$°K, °C$
ΔT	Gradiente da pressão de vapor	$k\ Pa\ °C^{-1}$
λ	Calor latente de vaporização da água	$J\ kg^{-1}$
β	Razão de Bowen	$-$
$\rho_{atm,b}$	Reflectância atmosférica	$-$
$\rho_{s,b}$	Reflectância de superfície	$-$
$\rho_{\lambda i}$	Reflectância aparente	$-$
ρ_{IVP}	Reflectância monocromática no infravermelho próximo	$-$
ρ_V	Reflectância monocromática no vermelho	$-$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W\ m^{-2}K^{-4}$
$\tau_{asc,b}$	Transmissividade atmosférica para a radiação solar refletida da superfície	$-$
$\tau_{inc,b}$	Transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente	$-$
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica	$-$
τ_{sw24h}	Transmissividade atmosférica média diária	$-$
ω	Coeficiente de ponderação do *LANDSAT*	$-$
Ψ_h	Correção de estabilidade para o transporte de calor	$-$
Ψ_m	Correção de estabilidade para o transporte de momentum	$-$

Lista de abreviaturas e siglas

ANA	Agência Nacional das Águas
BA	Estado da Bahia
BE	Balanço de Energia
CE	Estado do Ceará
CPACT	Embrapa Clima Temperado
CV	Coeficiente de Variação
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
DF	Distrito Federal
ET	Evapotranspiração
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GO	Estado de Goiás
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
MG	Estado de Minas Gerais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
PDG	Gleba Pé de Gigante
RECOR	Reserva Ecológica do Roncador
SC	Estado de Santa Catarina
RS	Estado do Rio Grande do Sul
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SP	Estado de São Paulo
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
TM	Thematic Mapper
USE	Usina Santa Elisa

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁREAS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DO BRASIL

Resumo

A agricultura irrigada é responsável por 47% da retirada de água dos mananciais no Brasil. A extração excessiva desse recurso pode afetar o clima, os regimes fluviais e as taxas de vazões, comprometendo a disponibilidade hídrica. Nesse contexto, o objetivo principal do trabalho foi analisar o consumo de água pela agricultura irrigada no processo de evapotranspiração em áreas de clima tropical e subtropical. Para isso, empregou-se o algoritmo *SEBAL/METRIC* nas imagens dos satélites *LANDSAT* 5 e 7. A validação do resultado foi realizada por meio da comparação entre os dados estimados e os obtidos pelo sistema de correlações turbulentas, coletados nas torres micrometeorológicas de Brasília-DF (clima tropical) e Paraíso do Sul-RS (clima subtropical). Os erros absolutos e relativos da evapotranspiração diária foram de 0,24 mm e 9,1% em Brasília e 0,03 mm e 0,5% em Paraíso do Sul, o que garante ao algoritmo a confiabilidade para estimar esta variável nos climas selecionados. Os resultados médios da Agricultura Irrigada foram comparados aos encontrados nas classes Cerrado/Pastagens e Campo/Pastagens, considerando que retratam da melhor forma possível os usos naturais dos respectivos climas. Nas áreas de clima tropical, a classe agricultura irrigada obteve valores médios absolutos entre 2,5 e 2,9 mm, aproximando-se dos adquiridos em Cerrado/Pastagens (2,1 a 2,9 mm), com diferenças relativas entre -2,5% e 20,1%. Entretanto, nas áreas de clima subtropical o contraste foi mais expressivo. Observaram-se resultados médios absolutos de 5,7 a 6,3 mm (agricultura irrigada), enquanto que em Campo/Pastagens os valores ficaram entre 3,2 a 4,4 mm. As diferenças relativas foram de 42,9% a 77,9%. Portanto, concluiu-se que o consumo de água pelo processo de evapotranspiração foi maior nos cultivos irrigados de clima subtropical.

Palavras-chave: consumo de água, *SEBAL/METRIC*, *LANDSAT*, recursos hídricos.

ENERGY BALANCE AND EVAPOTRANSPIRATION FROM REMOTE SENSING IN TROPICAL AND SUBTROPICAL AREAS OF BRASIL

Abstract

The irrigated agriculture is responsible for 47% of hydric consumption from water reservoirs in Brasil. The excessive extraction of that resource may cause problems to climate, river systems and water bodies. In this context, the main objective of this study was to evaluate the water consumption from irrigated agriculture on evapotranspiration process in tropical and subtropical areas. The evapotranspiration was estimated using the SEBAL/METRIC algorithm and images from satellites LANDSAT 5 and 7. The results of the estimates were validated using measurements from two micrometeorological towers installed in Brasília-DF (tropical climate) and Paraíso do Sul-RS (subtropical climate). The absolute and relative errors of daily evapotranspiration were 0,24 mm and 9,1% in Brasília and 0,03 mm and 0,5% in Paraíso do Sul, evidencing the applicability of algorithm for estimate that variable on climates chosen. The averages results from Irrigated Agriculture were compared to Grassland\Pastures and Herbaceous Vegetation\Pastures, because these classes characterize of better possible way the natural uses on respective climates. At the tropical climate areas, the absolute average results of Irrigated Agriculture class stayed between 2,5 and 2,9 mm, approaching of Grassland\Pastures (2,1 a 2,9 mm), with relative differences between -2,5% e 20,1%. However, at the subtropical climate areas, the differences were more significant. The Irrigated Agriculture class presented average values of 5,7 and 6,3 mm. At Herbaceous Vegetation\Pastures class, the results stayed between 3,2 and 4,4 mm, with relative differences between 42,9 % and 77,9 %. Therefore, the hydric consumption from evapotranspiration processes was bigger in the irrigated croplands of subtropical climate areas.

Key-words: water consumption, SEBAL/METRIC, LANDSAT, hydric resources.

1. Introdução

O Brasil possui 12% das reservas mundiais de água doce. A Agência Nacional das Águas (ANA, 2012) considera confortável a situação do país quanto à disponibilidade hídrica, mesmo com 68% desse total concentrado na região Norte, onde vivem apenas 7% da população. Diante dessa relativa abundância Lima *et al.* (1999) salientaram que, por muito tempo, o país não se interessou pela preservação dos recursos hídricos. Sendo assim, perdas desnecessárias ocorreram devido à falta de planejamento e ações que buscassem a otimização desse recurso, afetando o clima, os regimes fluviais e as taxas de vazões (SILVA *et al.*, 2011). A agricultura irrigada se destaca entre os principais responsáveis por esses impactos, pois é responsável por 47% da retirada dos mananciais e 69% do consumo total de água no Brasil (ANA, 2012). Além disso, a expansão das fronteiras agrícolas e implantação constante de projetos de irrigação têm contribuído para o aumento da demanda hídrica, principalmente nas regiões Centro-oeste e Nordeste. Nesta, as irregularidades do regime pluvial refletem diretamente na agricultura (SILVA, *et al*., 2005), sobretudo na estação seca.

No Sul do Brasil, diferentemente das regiões Nordeste e Centro-oeste, os índices pluviométricos costumam ser regulares durante todo o ano (EMBRAPA CLIMA TEMPERADO, 2013). Mesmo assim, o governo estadual do Rio Grande do Sul (RS) vem financiando projetos de irrigação por meio do programa Mais Água, Mais Renda (GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2013), com o propósito de contornar os problemas decorrentes do aumento e frequência dos períodos de estiagem (MAGALHÃES JÚNIOR *et al.*, 2007). Segundo Aguiar (2005) das dez safras entre 1995 a 2005 no RS, o fenômeno causou prejuízos significativos aos produtores em sete delas, além da perda de 37,8 milhões de toneladas de grãos nos últimos 20 anos.

Apesar dos benefícios gerados pela atividade, principalmente quanto às perdas decorrentes da variabilidade climática e de eventos meteorológicos adversos, muitos projetos ainda são pensados e executados somente pelo prisma econômico. Dessa forma, não levam em consideração os possíveis impactos sociais e ambientais relacionados à translocação da água para irrigação. Além disso, parte desta água se perde no processo de evapotranspiração (ET), que é controlado pela disponibilidade de energia, demanda atmosférica, suprimento de água e umidade no solo (PEREIRA

et al., 1997). Segundo Silva e Bezerra (2005), a ET é uma das principais componentes do ciclo hidrológico, sendo sua determinação imprescindível para o planejamento e manejo adequado da agricultura irrigada.

Usualmente, os métodos de determinação da ET se baseiam nos processos aerodinâmicos turbulentos e no balanço de energia (BE) (BRUTSAERT, 2009). Entretanto, Moors (2008) destaca que esta classificação é incompleta, pois não abrange as formulações postuladas no balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Ademais, são pontuais e representativos apenas para as áreas cujas condições fenológicas da vegetação sejam semelhantes, não sendo aconselháveis para estimativas regionais.

Em função disso, foram desenvolvidos métodos de estimativas por meio de imagens de satélite, dentre os quais se destacam o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)*, desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e Bastiaanssen *et al.* (1998) e o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (*METRIC)* formulado por Allen *et al*. (2007). Caracterizam-se como modelos semiempíricos, pois se utilizam do resíduo da equação do BE e de poucos dados meteorológicos adquiridos em superfície. Esses métodos já foram validados e testados em distintas regiões da superfície terrestre, com diferentes características de uso e cobertura da terra e condições climáticas, como demonstrado por Bastiaanssen *et al.* (2005). No Brasil, trabalhos dessa natureza foram amplamente explorados no Nordeste, entretanto há poucos estudos nas demais regiões.

Diante do que foi apresentado, o trabalho teve por objetivo principal analisar o consumo de água pela agricultura irrigada no processo de ET em áreas de clima tropical e subtropical, a partir da modelagem das componentes do BE por sensoriamento remoto.

Os objetivos específicos buscaram:

- ✓ validar as estimativas da modelagem dos fluxos de energia, bem como, da ET por meio dos dados observados em torres micrometeorológicas nas áreas de Goiás/Brasília (GO/DF) e Região Central-RS;
- ✓ classificar e mapear o uso e cobertura da terra das áreas selecionadas;
- ✓ estimar o valor médio das variáveis do BE e, consequentemente, ET_d para cada classe de uso mapeada;

- ✓ mapear e especializar a ET_d nas condições climáticas propostas em períodos de irrigação.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Irrigação e seus impactos hidrológicos

A irrigação abrange o conjunto de técnicas destinadas a deslocar a água de reservatórios ou corpos hídricos naturais para as áreas de cultivo com o propósito de manter a planta em condições ideias de umidade para o seu desenvolvimento (LIMA *et al.*, 1999). Dentre os principais métodos de irrigação destacam-se: aspersão e superfície. A irrigação por aspersão constitui-se de equipamentos responsáveis por lançar jatos de água sobre os cultivos, no intuito de produzir o fenômeno artificial da chuva. A sua eficiência depende, dentre outros fatores, do grau de pulverização das gotas. Nos casos em que são liberadas com baixa intensidade, grande parte se perde por evaporação, principalmente nos locais onde a velocidade do vento é alta. Contudo, altas intensidades provocarão danos às plantas de folhas sensíveis, bem como, diminuição da capacidade de infiltração no solo, devido à compactação gerada pelo impacto da gota, que aumenta quando os aspersores são de grande alcance (BERNARDO, 1995) como nos pivôs centrais (Figura 2.1.1A). Estes são amplamente utilizados nas regiões Nordeste e Centro-oeste do país.

Na irrigação por superfície, utilizada substancialmente no RS para o cultivo de arroz, enquadra-se a inundação contínua (Figura 2.1.1B), na qual a lâmina d'água é mantida por um longo período do ciclo da cultura. O deslocamento da água ocorre diretamente sobre o solo, por meio de canais ou tubulações, até o ponto de infiltração. Entretanto, necessita da sistematização do terreno para evitar que as perdas por percolação lateral e escoamento superficial se acentuem. Em geral, adapta-se a maioria das culturas e diferentes tipos de solos, desde que não sejam muito permeáveis (BERNARDO, 1995).

Diversos estudos (GOMES, 1994; LIMA *et al.*, 1999; BERNARDO, 2008; GOMES *et al.*, 2008) constataram que a irrigação por aspersão apresenta eficiência de 60% em zonas semiáridas e 75% em regiões de clima subtropical. Esse índice pode chegar a 90% quando aplicado no período noturno. Na irrigação por superfície as taxas ficam entorno de 40% a 75% (LIMA *et al.*, 1999). Os pesquisadores da Embrapa Clima Temperado (CPACT), em experimento para a minimização das perdas de recursos hídricos nas lavouras de arroz no RS (RURALBR, 2013), constataram que a produtividade adquirida pelo sistema de irrigação intermitente por

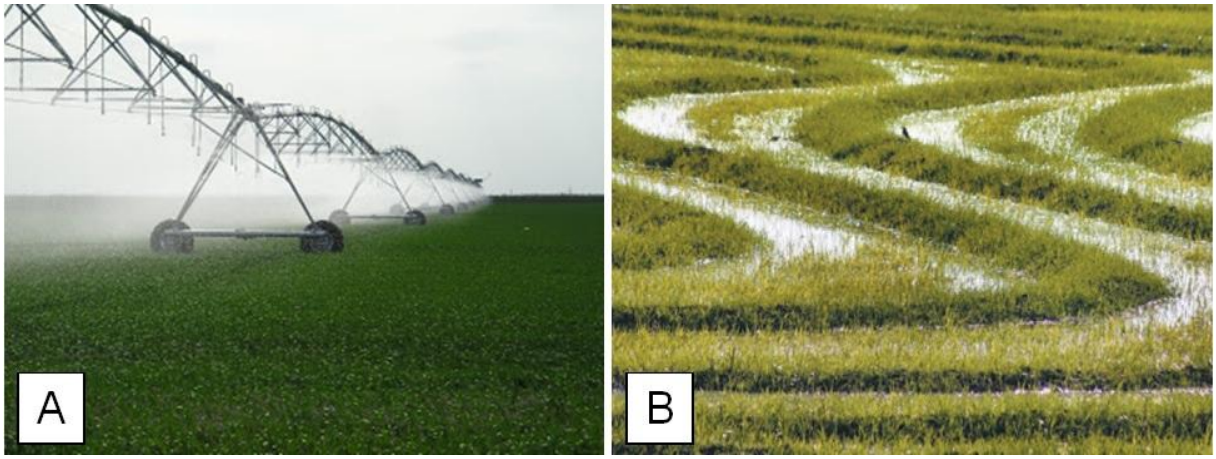


Figura 2.1.1. Diferentes métodos de irrigação. A) Intermitente por meio de pivô central; B) Contínua por inundação da superfície.

Fonte: Ruralbr (2013).

aspersão se aproxima ao obtido pela inundação contínua, na qual são injetadas de 9000 a 25000 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ (GOMES *et al.*, 2008). Neste estudo, os autores demonstraram a possibilidade de minimização dessa quantidade para 8000$m^3\ ha^{-1}$.

No RS, as elevadas taxas de vazão, durante o período de irrigação do arroz, são as principais responsáveis pelas quedas acentuadas da disponibilidade hídrica. Macedo (2004), em estudo do canal São Gonçalo e Lagoa Mirim, no sul do Estado, constatou que, após o período de irrigação (novembro-janeiro), os níveis de água costumam voltar às condições normais somente em meados de setembro. Situação semelhante de diminuição da disponibilidade hídrica foi observada no rio Pamplona na região hidrográfica do Paraná, onde se localiza parte do Estado de GO e todo o município de Cristalina (CARNEIRO *et al.*, 2011). Os autores destacaram que a extração excessiva de água para suprir as lavouras irrigadas corroborou para o aumento dos conflitos relacionados à utilização da água.

Os problemas de disponibilidade hídrica se acentuam com o desmatamento da vegetação nativa ou mudanças na cobertura da terra. Em estudo realizado por Collischonn *et al.* (2011), verificou-se que a construção desenfreada de reservatórios, para atender a demanda das áreas de cultivo no RS, corroborou para o aumento das taxas de ET na bacia hidrográfica e diminuição da vazão do rio Quaraí nos períodos de irrigação. Em função disso, das 477 lavouras analisadas, 186 tiveram problemas de déficit de atendimento.

Diante do que foi apresentado, Bernardo (2008) acrescenta que, em um futuro próximo, a irrigação somente será viável se forem adotadas medidas que visem o monitoramento da qualidade da água e da eficiência no seu uso. A falta de planejamento contribui para que as irrigações sejam executadas de maneira inadequada, tanto na questão da recorrência, ou seja, do tempo entre uma aplicação e outra, como também na quantidade.

Apesar dos impactos, a atividade proporciona: aumento da produtividade e lucro; eficiência no uso de fertilizantes; estímulo ao crédito; permite dois ou mais cultivos por ano em uma mesma área; possibilita a implantação de cultivos em situações climáticas desfavoráveis; minimiza as perdas por fatores meteorológicos adversos, como seca extrema; entre outros (BERNARDO, 2008). Contudo, além das perspectivas econômicas, os sistemas de irrigação devem ser projetados sob o prisma da sustentabilidade social e ambiental (LIMA *et al.*, 1999). Nesse aspecto, destaca-se a importância das estimativas de ET, visto que são fundamentais para análise dos impactos hidrológicos e uso da água pela irrigação.

2.2. Evapotranspiração

O termo ET surgiu para conceituar o somatório de dois processos naturais, ou seja, a evaporação e transpiração. Na evaporação, a água é convertida do estado sólido (sublimação) ou líquido para o estado gasoso. Esse mecanismo é acionado pelo calor latente (LE), que representa a quantidade de energia empregada na evaporação da água. A transpiração, no caso dos vegetais, corresponde à quantidade de água transferida à atmosfera na forma de vapor d'água por meio dos estômatos. Estes são pequenas aberturas na folha responsáveis pela comunicação com a atmosfera. Ademais, controlam os fluxos de gás carbônico e oxigênio para o crescimento e desenvolvimento da planta no processo de fotossíntese (Figura 2.2.1). A transpiração ainda evita o superaquecimento pela incidência direta da radiação solar, já que parte da energia absorvida é liberada na forma de vapor (NOVÁK, 2012).

No processo de ET as trocas de gás carbônico e oxigênio são proporcionais ao de vapor d'água. Sendo assim, elevadas taxas de absorção acarretam em altas perdas de água, em contrapartida, propiciam o aumenta da produtividade primária. A intensidade dos fluxos desses gases depende das características dos vegetais,

assim como, das condições atmosféricas predominantes (KLAR, 1984). Segundo Allen *et al.* (2006) os principais elementos meteorológicos que afetam a ET são: radiação solar, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento. Estes, somados a outras variáveis como: localização, altitude, topografia, cobertura da terra e época do ano, condicionam as componentes do BE.

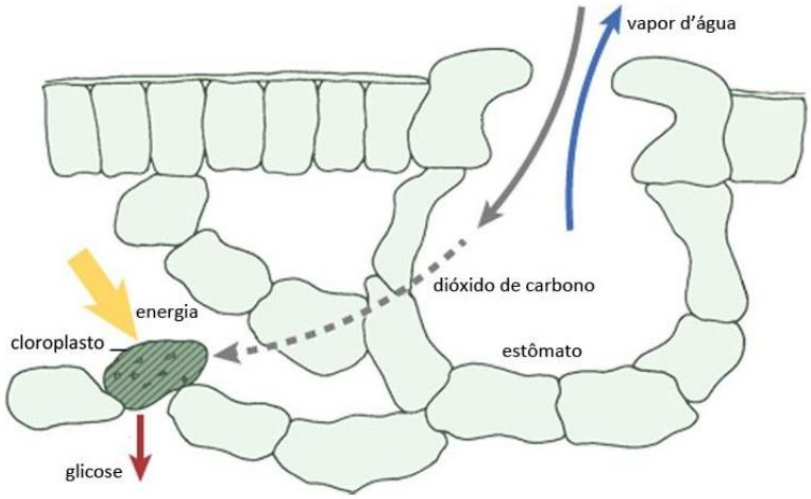


Figura 2.2.1. O processo de fotossíntese e transpiração da planta.
Fonte: Ruhoff (2011) apud Sellers *et al.* (1992).

Os fluxos de energia interagem com os alvos contidos em determinada superfície até retornarem à atmosfera, seja pela evaporação direta ou ET. De forma ilustrativa, visualiza-se este processo na Figura 2.2.2.

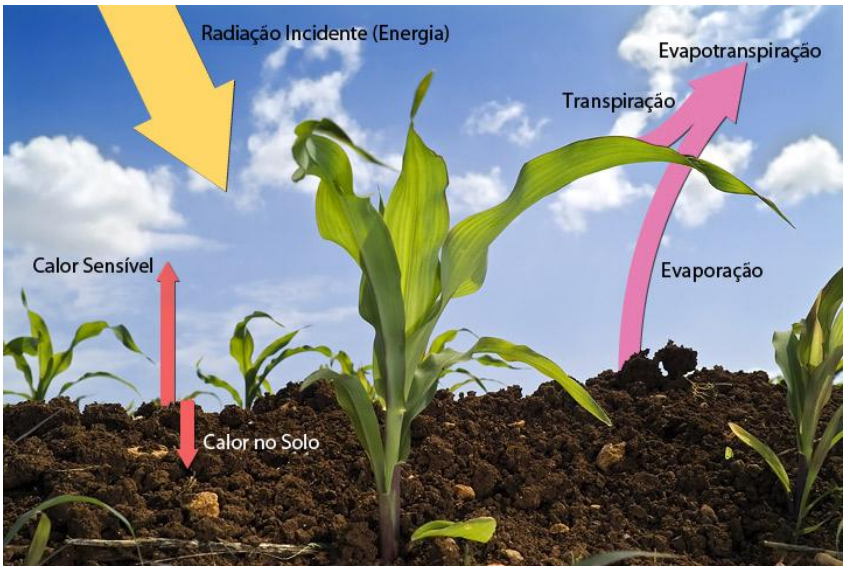


Figura 2.2.2. Mecanismos que governam o processo de ET.
Fonte: Adaptado de *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2013).

A radiação solar, ao entrar em contato com a atmosfera, sofre uma série de reações físico-químicas. Neste processo, considerável parcela de energia é absorvida pelas nuvens e gases contidos na atmosfera. O restante atinge a superfície terrestre, sendo por ela absorvida, refletida, transmitida ou reemitida (radiação termal). Dessa forma, são utilizadas no aquecimento dos alvos contidos na superfície (NOVÁK, 2012), sendo divida, predominantemente, entre o fluxo de calor no solo (G), o fluxo de calor sensível (H) e o LE.

Quando determinada superfície recebe radiação, uma fração da mesma é transportada para as camadas mais profundas do solo (G). No período noturno, a energia armazenada ascende para as camadas superiores, atuando como estabilizador térmico (LEITÃO, 1989). Acima do solo, na camada limite entre a superfície e atmosfera, ocorre o fluxo vertical de calor (H). Dentre outras variáveis, a espessura da camada limite dependerá da velocidade do vento e da rugosidade da superfície. O vento provoca o movimento do ar, sendo um dos responsáveis pelas variações das perdas de água pelas superfícies líquidas, além de diminuir a camada limite das folhas. Em determinadas condições de umidade relativa do ar, sua influência aumenta, em função da diminuição da temperatura (PEREIRA *et al.*, 1997).

A porcentagem restante do saldo de radiação (Rn) é utilizada no processo de vaporização da água (LE). Sendo assim, a energia recebida por determinada superfície evaporante deve ser igual a perdida e armazenada, havendo o equilíbrio (ALLEN *et al.*, 2006). Devido à complexidade desse processo, definiram-se conceitos no intuito de enquadrar, da melhor forma possível, as distintas variáveis e situações que alteram e influenciam as taxas de ET despendidas à atmosfera.

2.2.1. Conceitos

Dentre os conceitos de ET, destacam-se: ET de referência (ET_0 ou ET_r); ET real (ETR) e ET da cultura (PEREIRA *et al.*, 1997).

O conceito de ETo foi introduzido para avaliar o poder evaporativo da atmosfera, independentemente do tipo de cultivo, seu desenvolvimento ou práticas de manejo. Entretanto, somente assumir-se-á que os fatores relacionados à cultura não influenciarão nas taxas de ET em áreas com características específicas, no que

se refere à altura, preenchimento e resistência aerodinâmica da cobertura vegetal (ALLEN *et al.*, 2006).

O conceito de ETR é utilizado quando se deseja avaliar as taxas de ET para qualquer tipo de uso da terra ou cultivo em condições naturais. Diante disso, dificilmente será adotado para comparações entre áreas distintas, devido ao intenso dinamismo das variáveis meteorológicas e das especificidades das culturas (MATZENAUER, 1999).

A ET da cultura pode ser dividida em ET sob condições padrão (ETc) e ET sob condições não padrão ($ETc\ adj$) (ALLEN *et al.*, 2006). A primeira corresponde à ET da cultura sob ótimas condições de umidade e nutrientes no solo, sem problemas patológicos, bem fertilizada e plantada de forma extensiva. Para determinação da ETc leva-se em consideração o coeficiente da cultura (Kc), que varia em função do tipo de cultivo e do seu estádio de desenvolvimento. A segunda representa a ET da cultura em condições naturais de cultivo, sujeita a empecilhos como presença de pragas, doenças, baixa fertilidade do solo, escassez ou excesso de água, dentre outros parâmetros. Como depende das condições meteorológicas e atmosféricas atuantes, há possibilidade do crescimento limitado e com baixa densidade (PEREIRA *et al.*, 1997).

Existem diversos métodos que estimam os diferentes conceitos de ET, cujas medidas representam o volume por unidade de água ou lâmina d'água expressa em valores totais, médios ou diários.

2.2.2. Métodos de estimativa

2.2.2.1. Convencionais

Usualmente, as estimativas de ET são baseadas em modelos hidrológicos (balanço hídrico), e métodos micrometeorológicos. Os modelos hidrológicos são utilizados para o planejamento do uso da água em bacias hidrográficas, cuja precisão depende da qualidade das medições de precipitação, variações de umidade no solo, escoamento superficial e percolação. A chuva e a irrigação são as variáveis de entrada, enquanto que as de saída são representadas pela ET, escoamento superficial (RO: $m^3\ s^{-1}$), percolação profunda (DP: mm) e ascensão

capilar (AC: mm). Diante da dificuldade de se avaliar os fluxos de escoamento, as taxas de ET (mm) são deduzidas pelas mudanças na quantidade de água presente no solo. Sua utilização é aconselhada para períodos longos, da ordem de semanas, meses e anos (ALLEN *et al.*, 2006). Na Eq. 2.2.2.1.1 visualiza-se a expressão do balanço hídrico. Nos casos em que há suprimento externo via irrigação, esta componente deve ser adicionada (PEREIRA *et al.*, 1997).

$$\Delta A = P + AC - DP - RO - ET \quad (2.2.2.1.1)$$

no qual, ΔA (mm) representa a variação do armazenamento de água entre o início e fim do período analisado; P (mm)corresponde a quantidade de chuva.

Os métodos de transferência de massa se baseiam no movimento vertical dos vórtices turbulentos. Este transportam o calor e outros elementos contidos na atmosfera, principalmente vapor d'água. O gradiente de vapor d'água e velocidade do vento são obtidos por meio de medidas precisas de pressão, vapor, temperatura do ar e velocidade do vento, em diferentes níveis na superfície terrestre. Devido à complexidade, sua aplicação se restringe às estações experimentais (CARNEIRO, 2007). Nesse método, enquadram-se a razão de Bowen (β) e correlações turbulentas.

Na razão de Bowen (Eq. 2.2.2.1.2) são necessárias medidas de temperatura e umidade em dois níveis acima da superfície evaporante (FOLHES, 2007).

$$\beta = \frac{H}{\lambda LE} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta+\gamma}{\gamma}\right)\left(\frac{\Delta T}{\Delta e}\right) - 1} \quad (2.2.2.1.2)$$

onde, Δ representa a curva de pressão de saturação do vapor d'água em razão da temperatura do ar ($k\ Pa\ °C^{-1}$), γ é o coeficiente psicrométrico ($k\ Pa\ °C^{-1}$), ΔT ($k\ Pa\ °C^{-1}$) e Δe ($k\ Pa\ °C^{-1}$) correspondem ao gradiente de temperatura e pressão de vapor no sentido vertical, respectivamente. Sendo assim, calcula-se o LE ($W\ m^{-2}$) pela Equação 2.2.2.1.3:

$$LE = \frac{Rn-G}{1+\beta} \quad (2.2.2.1.3)$$

Rn ($W\ m^{-2}$) e G ($W\ m^{-2}$) são obtidos por meio de medidas provenientes dos sensores instalados em campo.

No método das correlações turbulentas, os instrumentos utilizados permitem o cálculo preciso das flutuações instantâneas das propriedades atmosféricas (FOLHES, 2007). Medições com incertezas de até 10% são consideradas aceitáveis e consistentes (TWINE *et al.*, 2000). Para isso, os sensores devem operar em frequências elevadas, pois somente desta forma as pequenas flutuações são computadas (SCHIMD, 1997).

Os fluxos verticais de gás carbônico (CO_2), de calor sensível e de vapor d'água são determinados pela correlação entre os desvios verticais do vento (F_v: $W\ m^{-2}$), em função dos desvios temporais de um escalar (Eq. 2.2.2.1.4):

$$F_v = \overline{wp_c} \tag{2.2.2.1.4}$$

onde, w ($m\ s^{-1}$) corresponde à componente vertical da velocidade do vento, p_c diz respeito a densidade do escalar c.

A intensidade das flutuações que ocorrem na atmosfera proporcionam a necessidade de analisar, separadamente, a componente vertical da velocidade do vento e a densidade do escalar. Esse processo, denominado de decomposição de Reynolds (BEZERRA, 2006), é realizado por meio das Equações 2.2.2.1.5 e 2.2.2.1.6:

$$w = \overline{w} + w' \tag{2.2.2.1.5}$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho_c{}' \tag{2.2.2.1.6}$$

no qual, $\overline{w}$ e $\overline{\rho_c}$ correspondem às componentes médias, enquanto que w' e $\rho_c{}'$ as turbulentas ou desvios em relação aos valores médios.

Substituindo-se as Equações 2.2.2.1.5 e 2.2.2.1.6 na 2.2.2.1.4, obtém-se a expressão de ajuste. descrita na Eq. 2.2.2.1.7:

$$F_v = \overline{w\rho_c} + \overline{w'\rho_c{}'} \tag{2.2.2.1.7}$$

Com o ajuste finalizado, calculam-se os fluxos turbulentos H ($W\ m^{-2}$) e LE, a partir das Equações 2.2.2.1.8 e 2.2.2.1.9:

$$H = \rho . C_p . \overline{w'T'} \tag{2.2.2.1.8}$$

$$LE = \rho . L_v . \overline{w'q'} \tag{2.2.2.1.9}$$

onde, ρ ($Kg\ m^{-3}$) corresponde a densidade do ar, C_p ($J\ kg^{-1}\ k^{-1}$) o calor específico obtido à pressão constante, T' a componente turbulenta do ar, expressa em °K; L_v ($J\ Kg^{-1}$) o calor latente de vaporização da água; e q' ($kg\ kg^{-1}$) a flutuação da umidade específica do ar.

Os métodos listados de monitoramento da ET são pontuais e representativos apenas aos locais onde se situam os sensores que realizam as medições. Para sanar esse problema são utilizadas técnicas de interpolação, que consideram os pesos e as distâncias entre as amostras para extrapolação dos resultados. Contudo, as incertezas aumentam quando não há distribuição significativa de amostras para representação do fenômeno na escala pretendida. Diante disso, foram desenvolvidos métodos para estimativa de ET por imagens de satélite. Como cada pixel possui um número digital (ND) que pode ser transformado em parâmetros físicos atuantes na superfície terrestre, não há necessidade de extrapolação dos resultados. As interações água-solo-planta-atmosfera são adquiridas diretamente na imagem, dispensando a utilização de complexos processos micrometeorológicos ou hidrológicos. Sendo assim, a escala de representação do fenômeno na superfície terrestre será correspondente à resolução espacial da imagem utilizada (FOLHES, 2007).

2.2.2.2. Sensoriamento remoto

Dentre os métodos de estimativa de ET por sensoriamento remoto, destaca-se o algoritmo *SEBAL* (BASTIAANSSEN, 1995) e *METRIC* (ALLEN *et al*., 2007). Esses modelos são bastante similares, sendo que a principal diferença ocorre nos processos de correção atmosférica e obtenção do H, desde a seleção dos pixels âncoras até o cálculo empregado no cômputo do gradiente de temperatura. No entanto, ambos são fundamentados e baseados no resíduo da equação do BE (Eq. 2.2.2.2.1). Nesta, as energias de entrada e saída são iguais para o mesmo período de tempo (ALLEN *et al.*, 2006). Desconsidera-se o calor armazenado ou liberado pela planta, bem como, a energia utilizada em seus processos metabólicos, pois respondem por uma pequena parcela da radiação líquida, sendo desprezível quando comparada às demais variáveis.

$$Rn - G - H - LE = 0 \qquad (2.2.2.2.1)$$

Esses modelos foram validados e testados em diferentes condições climáticas, de uso e cobertura da terra e sistemas agrícolas implantados (BASTIAANSSEN *et al.*, 2005), apresentando bons resultados. No Brasil, tem sido aplicado, principalmente, nas regiões áridas e semiáridas do Nordeste do país, onde os sistemas de irrigação são implantados em boa parte dos cultivos. Os estudos buscam analisar as potencialidades do modelo para o planejamento do uso da água em sistemas agrícolas, auxiliando no manejo e gerenciamento correto dos recursos hídricos. Dentre esses, citam-se os realizados por Bezerra (2006) e Teixeira *et al.* (2009b), na microrregião do Cariri cearense e bacia hidrográfica do Baixo-Médio São Francisco, respectivamente. Os dados foram comparados aos encontrados nas estações experimentais localizadas em áreas de agricultura irrigada e vegetação nativa. As diferenças relativas foram inferiores a 20% para as variáveis do BE e evapotranspiração diária (ET_d: mm) em cultivos de algodão e mamona (BEZERRA, 2006), bem como, menores que 5% e 1% para ETR_d acumulada em áreas de vegetação nativa e cultivo de manga (TEIXEIRA *et al.*, 2009b).

Ruhoff (2011) também aplicou o algoritmo em estudo na bacia do Rio Grande, situada entre os Estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG). Os valores foram comparados aos obtidos pelas torres micrometeorológicas Gleba Pé de Gigante (PDG) (Cerrado) e Usina Santa Elisa (USE) (Cana-de-açúcar). A fração evaporativa (FE), saldo de radiação diário (Rn_{24h} : $W \ \ m^{-2}$) e ETR_d apresentaram, respectivamente, incertezas relativas de 18%, 15% e 55% (PDG), bem como, 12%, 23% e 32% (USE), evidenciando que, apesar de confiável, o algoritmo tende a superestimar os resultados.

SILVA *et al.* (2012) validaram os dados de ET_d estimados pelo *SEBAL* com os obtidos pelo método Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN *et al.*, 2006), em estudo realizado no perímetro irrigado de São Gonçalo na Paraíba, região semiárida brasileira. Os cálculos da raiz do erro médio quadrático, erro relativo médio e erro absoluto médio, demonstraram diferenças de 0,53 mm 9,46 % e 0,43 mm , respectivamente.

Em suma, os estudos citados apresentaram baixas incertezas entre os dados estimados pelo *SEBAL* com os obtidos em superfície, o que garante ao algoritmo a confiabilidade para a aplicação nesse trabalho.

3. Áreas de estudo

Selecionaram-se três áreas em clima tropical e subtropical, de acordo com a classificação climática do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002). As áreas de clima tropical situam-se nos Estados da Bahia (BA), GO/DF, e MG, enquanto que as de subtropical foram definidas no Estado do RS (Fronteira Oeste, Região Central e Extremo Sul). As delimitações priorizaram os cultivos por meio de pivôs centrais (tropical) e arroz irrigado (subtropical). Na Figura 3.1 visualiza-se a localização das áreas de estudo.

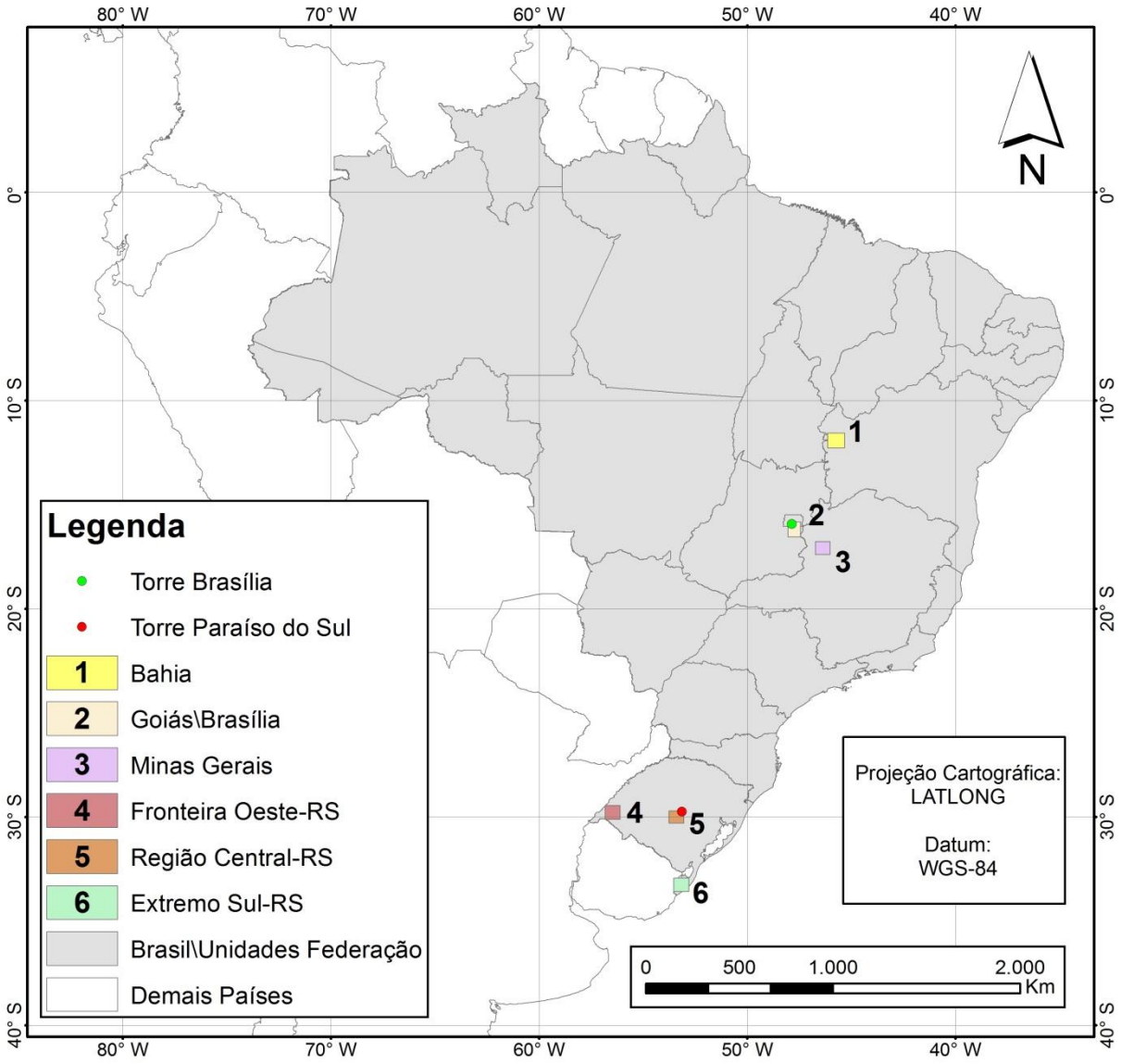


Figura 3.1. Mapa de localização das áreas de estudo selecionadas.

Os municípios enquadrados nas áreas de clima tropical são: Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e Riachão das Neves (Bahia); Brasília, Cidade Ocidental, Cristalina, Luziânia, Nova Gama e Valparaíso de Goiás (Goiás/Distrito Federal); Brasilândia de Minas, Dom Bosco, João Pinheiro, Paracatu e Unaí (Minas Gerais). O cultivo da soja é a principal atividade agrícola desses municípios, segundo levantamento realizado pelo IBGE (2013a) entre 1990 e 2011. De acordo com a Ceragro (2013), o cultivo da soja irrigada se inicia em maio com a colheita prevista para setembro (Quadro 3.1).

Quadro 3.1. Calendário agrícola da soja irrigada no Nordeste e Centro-oeste do Brasil

Fases da Cultura	**Meses**											
	Jan	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**
Preparo do solo												
Semeadura ou Plantio												
Tratos Culturais												
Colheita												
Comercialização												

Fonte: Adaptado de Ceragro (2013).

As regiões Nordeste e Centro-Oeste apresentam duas estações bem definidas, com verão chuvoso (outubro a abril), e inverno seco (maio a setembro), conforme se observa na Figura 3.2. Nesta, são apresentadas as normais climatológicas do acumulado médio da precipitação, da temperatura mínima e da máxima nas estações meteorológicas de Barreiras-BA, Brasília-DF e Paracatu-MG (INMET, 2013).

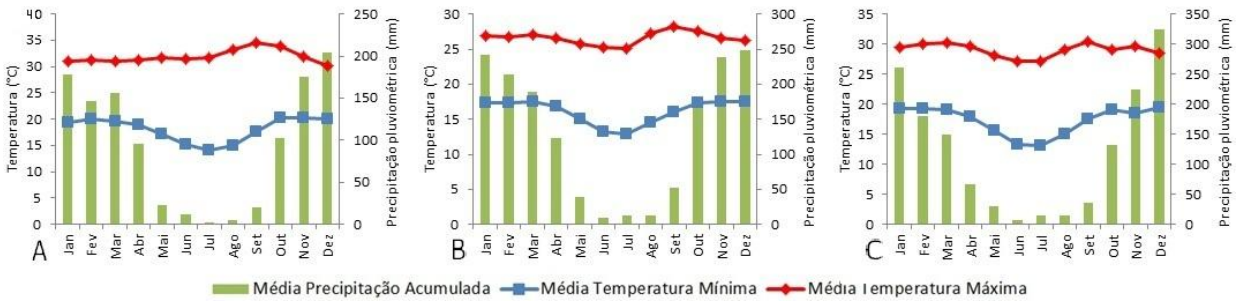


Figura 3.2. Normais climatológicas do acumulado médio da precipitação pluviométrica e das temperaturas mínimas e máximas. A) Barreiras-BA; B) Brasília-DF; C) Paracatu-MG.

Fonte: INMET (2013).

Apesar dos baixos índices pluviométricos em boa parte do ano (maio a setembro), Gaspar (2006) afirma que o clima regional vem desempenhando papel relevante para a expansão agrícola, fomentado pela existência de extensos mananciais superficiais, reservatórios de armazenamento, além das altas taxas de vazões provenientes do rio São Francisco. Mesmo assim, a região apresentou baixo nível de ocupação e atividade econômica até meados da década de 1950. Essa realidade começou a mudar nos últimos anos com o intenso processo de evolução tecnológica na agricultura, provocando transformações de ordem ambiental, social e cultural (SANTOS, 2000). Neste processo, insere-se a implantação da soja mecanizada, incentivada pela sua importância para a balança comercial brasileira (BARRETO, 2008). Na estação seca, seu cultivo é realizado por meio do uso intensivo de equipamentos de irrigação. Estima-se que, somente no Estado GO, haja dois mil e duzentos projetos de irrigação irregulares. Dessa forma, os impactos ambientais sobre os recursos hídricos podem ser agravados diante da falta de controle na retirada de água dos reservatórios (BARRETO, 2008).

Situação semelhante foi constatada no RS, onde os meses (novembro a janeiro) mais críticos de disponibilidade hídrica correspondem ao período em que há o maior uso da água pela rizicultura (Quadro 3.2). Por isso, as áreas de clima subtropical foram selecionadas nas regiões que se destacam no cultivo de arroz (IBGE, 2013a). Enquadraram-se nos recortes realizados, os municípios de: Alegrete, Quaraí e Uruguaiana (Fronteira Oeste); Agudo, Cachoeira do Sul, Formigueiro, Paraíso do Sul, Restinga Seca, Santa Maria, São João do Polêsine, São Sepé e Silveira Martins (Região Central); Santa Vitória do Palmar (Extremo Sul).

Quadro 3.2. Calendário agrícola do arroz no Estado do RS

Fases da Cultura	**Meses**											
	Jan	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**
Preparo do solo												
Semeadura ou Plantio												
Tratos Culturais												
Colheita												
Comercialização												
Entressafra												

Fonte: Adaptado de SAA (2012).

Mesmo apresentando regimes pluviométricos regulares durante todo o ano (Figura 3.3), conforme constado pelas normais climatológicas disponibilizadas pela

CPACT (2013), as precipitações normais não são suficientes para atender as necessidades hídricas das lavouras de arroz (AGUIAR, 2005), corroborando para extração excessiva dos mananciais.

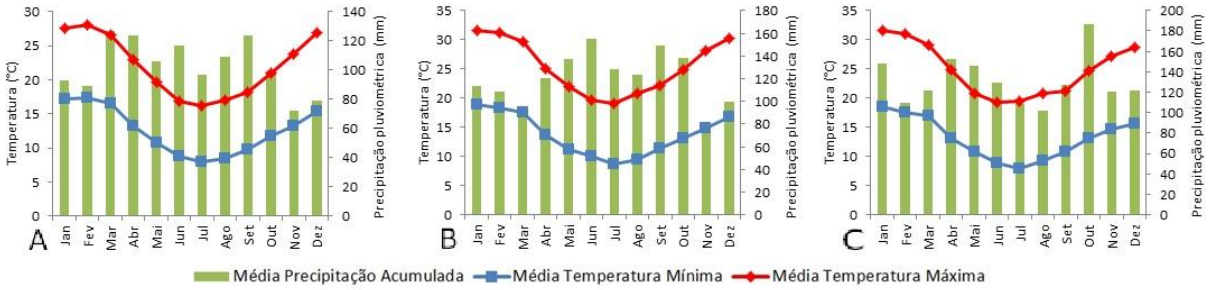


Figura 3.3. Normais climatológicas do acumulado médio da precipitação pluviométrica e das temperaturas mínimas e máximas. A) Alegrete; B) Cachoeira do Sul; C) Santa Vitória do Palmar.

Fonte: (INMET, 2013).

Essa intensa utilização da água tem contribuído para o esgotamento das reservas (MACHADO, 2007; GOMES *et al.*, 2008; COLLISCHONN *et al.*, 2011), cujas consequências são sentidas, principalmente, nos períodos de estiagem (MAGALHÃES JÚNIOR *et al.*, 2007).

4. Procedimentos metodológicos

4.1. Materiais

Primeiramente, buscou-se bases cartográficos como arquivos vetoriais (IBGE, 2013b) e imagens dos satélites *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT) 5 e 7 sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), fornecidas gratuitamente pela NASA (GLCF, 2013). Estas são disponibilizadas previamente processadas e corrigidas geometricamente. Procurou-se por imagens cujas datas correspondessem ao período de irrigação da soja (clima tropical) e do arroz (subtropical). No Quadro 4.1.1 são apresentadas as informações das imagens e valores do ângulo de elevação solar (°), cosseno do ângulo zenital solar (Z), radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\downarrow}$: $W\ m^{-2}$) e radiação instantânea incidente na superfície ($R_{S\downarrow}$: $W\ m^{-2}$) no momento da passagem do satélite.

Quadro 4.1.1. Informações das imagens utilizadas.

Área de Estudo	**Sensor/ Data**	**Órbita Ponto**	**Horário hh/mm/ss**	**Ângulo de elevação solar (°)**	**Cos do ângulo zenital solar (Z)**	**Radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\downarrow}$)**	**Radiação instantânea incidente na superfície ($R_{S\downarrow}$)**
Bahia	ETM+ 27/06/2001	220/ 068	09:56:40	43,10	0,6834	322,2	659,9
Goiás\ Brasília	TM 08/07/2011	221/ 071	10:03:54	39,69	0,6387	302,5	613,4
Minas Gerais	ETM+ 29/07/2001	220/ 072	09:58:07	40,97	0,6558	315,9	620,1
Fronteira Oeste-RS	TM 31/01/2004	224/ 081	10:16:06	51,15	0,7788	339,0	776,1
Região Central-RS	TM 18/02/2004	222/ 081	10:03:50	48,20	0,7455	329,7	759,4
Extremo Sul-RS	ETM+ 31/12/2000	222/ 083	10:16:06	57,25	0,8411	309,7	879,1

Devido a influência da umidade no solo no BE e, consequentemente, ETR_d, foram coletados dados pluviométricos dos quinze dias que antecederam a aquisição da imagem (Quadro 4.1.2). Também são apresentadas as estações meteorológicas e torres micrometeorológicas das quais se extraíram os dados utilizados no modelo *SEBAL/METRIC* (Capítulo 4.2.1).

Quadro 4.1.2. Quantidade de chuva (mm) nos quinze dias antecedentes à aquisição da imagem

Dias antecedentes à passagem do satélite	Áreas					
	Bahia Barreiras (INMET)	**Goiás\ Brasília Roncador (IBGE)**	**Minas Gerais Paracatu (INMET)**	**Fronteira Oeste-RS Uruguaiana (INMET)**	**Região Central-RS Paraíso do Sul (SULFLUX)**	**Extremo Sul-RS Santa Vitória do Palmar (INMET)**
-15	0,0	0,0	0,0	0,0	34,8	27,7
-14	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0
-13	0,0	0,0	0,0	0,0	20,1	0,0
-12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-11	0,0	0,0	0,0	21,7	0,0	0,0
-10	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
-9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
-8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-4	0,0	0,0	0,0	0,0	23,6	34,0
-3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	1,2
-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2

Para validação dos resultados estimados foram utilizados os dados das torres micrometeorológicas de Brasília e Paraíso do Sul (RS). A torre de Brasília se localiza na Reserva Ecológica do Roncador (RECOR), administrada pelo IBGE, cujas coordenadas são: 15°55'51,2''S e 47º52'21.3''W. Instalada em 2000, sobre área com o predomínio de vegetação savânica de cerrado, possui aproximadamente 8,5m de altura (LBA, 2014). No Quadro 4.1.3 são apresentados os instrumentos e características das variáveis utilizadas.

Quadro 4.1.3. Caracterização e descrição dos instrumentos instalados no sítio micrometeorológico de Brasília

Medida	**Instrumento utilizado**	**Altura/Profundidade**	**Frequência**
Saldo de radiação	NR-LITE (Kipp&Zonen)	7m	Média de 10min
Precipitação	TB4 (Hydrological Services Pty. Ltd.)	9m	Média de 10 min
Velocidade (3-D) e direção do vento	R3-50 (Gill Instruments Ltd.)	10m	10 Hz, média de 30 min
Velocidade (3-D) e direção do vento	8100 (RM Young)	10m	Média de 10 min
Temperatura e umidade do ar	HMP 45AC (Vaisala)	9m	Média de 10 min
Fluxo de calor no solo	HFP01 (Hukseflux)	0,10m	Média de 10 min

Fonte: Adaptado de LBA (LBA, 2014).

A torre de Paraíso do Sul foi instalada a 10m de altura e 108m acima do nível do mar, sobre terreno consideravelmente plano e praticamente homogêneo (TIMM, 2011). Localiza-se nas proximidades do rio Jacuí em uma área de cultivo de arroz, nas seguintes coordenas: 29º 44’ 39,6”S e 53º 8’ 59,8”W (SULFLUX, 2013). Contudo, operou somente entre junho de 2003 a julho de 2004. No Quadro 4.1.4, observa-se as variáveis utilizadas, bom como, os equipamentos e suas características.

Quadro 4.1.4. Caracterização e descrição dos instrumentos instalados no sítio micrometeorológico de Paraíso do Sul (Região Central do RS)

Medida	**Instrumento utilizado**	**Altura/Profundidade**
Saldo de radiação	NR LITE/Kipp&Zonen	10m
Precipitação	TB4 Rain Gage/Campbell Sci	10 m
Velocidade (3-D) e direção do vento	CSAT3/Campbell Sci	10 m
Temperatura e umidade do ar	HMP45C-L/Campbell Sci	10 m
Fluxo de calor no solo	HFP01SC/Hukseflux:	0,07 m

Fonte: (SULFLUX, 2013).

Os dados das torres foram comparados ao valor médio de uma janela 3x3, conforme sugerido por diversos autores (FOLHES, 2007; NICÁCIO, 2008; RUHOFF, 2011), sendo o pixel central correspondente às coordenadas de localização da torre. Os autores atribuem esse procedimento devido às incertezas oriundas dos erros de registro das imagens e pela influência dos fluxos que ocorrem no entorno do pixel central. Para análise das divergências entre os dados, calcularam-se os erros absolutos (EA) e relativos (ER), conforme demonstrado, respectivamente, nas Equações 4.1.1 e 4.1.2:

$$EA = X_{Est} - X_{Med} \tag{4.1.1}$$

$$ER = \left(\frac{X_{Est} - X_{Med}}{X_{Med}}\right) * 100 \tag{4.1.2}$$

onde, X_{Est} corresponde a estimativa realizada pela modelagem; X_{Med} representa o valor medido pela torre micrometeorológica.

4.2. Métodos

4.2.1. Algoritmo *SEBAL/METRIC*

Para o processamento dos dados e aplicação do algoritmo foi utilizado o aplicativo Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) (CAMARA *et al.*, 1996) v. 5.1.7 e sua Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL).

O *SEBAL/METRIC* foi executado seguindo as etapas formuladas por Bastiaanssen *et al*. (1998) e Allen *et al.* (2002, 2007). Calcularam-se as seguintes variáveis: (*i*) radiância espectral (L_λ: $W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$); (*ii*) reflectância aparente ($\rho_{\lambda i}$); (*iii*) reflectancia de superfície ($\rho_{s,b}$); (*iv*) albedo corrigido aos efeitos atmosféricos (α_s); (*v*) índices de vegetação, como Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ($IVDN$), Índice de Vegetação ao Ajuste do Solo ($IVAS$) e Índice de Área Foliar (IAF); (*vi*) emissividades de superfície (ε_{NB} e ε_o), temperatura de superfície (T_s: $°K$) e transmissividade atmosférica (τ_{sw}); (*vii*) radiações de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$: $W\ m^{-2}$) e incidente, assim como, onda curta incidente; (*viii*) Rn, G, H, LE, ET horária (ET_h: mm) e ET_d.

Primeiramente, converteram-se os NDs em L_λ (Eq. 4.2.1.1), que corresponde à energia solar registrada pelos sensores *TM e ETM+* no topo da atmosfera. Os valores de ajuste das bandas do *LANDSAT* foram extraídos de Chander *et al.* (2009) adaptados de Markham e Barker (1987).

$$L_{\lambda i} = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}\right)(Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_\lambda \qquad (4.2.1.1)$$

onde, $LMAX_\lambda$ e $LMIN_\lambda$ são os coeficientes de calibração espectral máximo e mínimo ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$) de cada banda; Q_{calmax} e Q_{calmin} são as intensidades máxima e mínima possíveis para o valor do pixel (ND); Q_{cal} corresponde as imagens digitais (ND).

Posteriormente, realizou-se a razão entre o fluxo de radiação solar refletida e o fluxo de radiação solar monocromática incidente ($\rho_{\lambda i}$) para o cômputo da reflectância aparente (Eq. 4.2.1.2):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi . L_{\lambda i}}{ESUN_{\lambda i} . cosZ . d_r} \qquad (4.2.1.2)$$

na qual, $ESUN_{\lambda i}$ é a medida exo-atmosférica para cada banda no topo da atmosfera ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$), cujos coeficientes de ponderação foram extraídos de Chander *et al.* (2009); Z (rad) é o ângulo zenital solar; d_r é o quadrado da distância relativa Terra e Sol.

No processo de correção atmosférica, executou-se, primeiramente, o cálculo da pressão atmosférica (P: $°K\ Pa$), conforme Eq. 4.2.1.3:

$$P = 101.3 * \left(\frac{Tar - 0.0065 * z}{Tar}\right)^{5.26} \quad (4.2.1.3)$$

sendo, Tar a temperatura média do ar ($ºK$) coletada nas estações meteorológicas (Quadro 4.1.2); z a altitude do terreno, cujos dados foram extraídos de imagens *ASTER GDEM* (2013) com 30m de resolução espacial.

A pressão parcial de vapor d'água atmosférico (e_a: $°K\ Pa$) foi adquirida através da Eq. 4.2.1.4:

$$e_a = \frac{\left[\left[0.6108 * exp * \left(\frac{17.27 * Tar}{Tar + 273.3}\right) * HR\right]\right]}{100} \quad (4.2.1.4)$$

na qual, HR é a umidade relativa do ar coletada nas estações meteorológicas.

Posteriormente, obteve-se a água precipitável na atmosfera ou vapor d'água (W: mm^{-1}) (Eq. 4.2.1.5), bem como, a transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente ($\tau_{inc,b}$) (Eq. 4.2.1.6):

$$W = 0.14 * e_a * P + 2.1 \quad (4.2.1.5)$$

$$\tau_{inc,b} = C_1 \exp * \left[\frac{C_2 P}{Kt * cosZ} - \frac{C_3 * W + C_4}{cosZ}\right] + C_5 \quad (4.2.1.6)$$

onde C_1 a C_5 são coeficientes derivados de modelo de transferência radiativa; Kt corresponde à turbidez atmosférica, que varia entre 0,5 (presença maciça de aerossóis, ar extremamente túrbido) a 1 (condições de céu-claro).

A transmissividade atmosférica para a radiação solar refletida da superfície ($\tau_{asc,b}$) foi encontrada por meio da Eq. 4.2.1.7:

$$\tau_{asc,b} = C_1 \exp * \left[\frac{C_2 P}{Kt * cos\eta} - \frac{C_3 * W + C_4}{cos\eta}\right] + C_5 \quad (4.2.1.7)$$

sendo, η o ângulo de visada do sensor. Sugere-se o valor 1, pois o *LANDSAT* tem ângulo de visada próximo ao nadir.

Após, obteve-se a reflectância atmosférica ($\rho_{atm,b}$) de acordo com a Eq. 4.2.1.8:

$$\rho_{atm,b} = C_b * (1 - \tau_{inc,b}) \quad (4.2.1.8)$$

sendo C_b os coeficientes definidos pelo modelo de transferência radioativa.

Por fim, chegou-se na refletância de superfície ou corrigida aos efeitos atmosféricos ($p_{s,b}$) (Eq. 4.2.1.9):

$$\rho_{s,b} = \frac{\rho_{\lambda i} - \rho_{atm,b}}{\tau_{inc,b} * \tau_{asc,b}} \quad (4.2.1.9)$$

O cálculo do albedo ajustado aos efeitos atmosféricos (α_s) foi realizado pela combinação linear da reflectância de superfície em cada banda. Dessa forma, representa todo o domínio da radiação solar incidente à superfície (0,3 – 3,0μm^{-1}), conforme Eq. 4.2.1.10:

$$\alpha_s = \sum_{\lambda=1}^{n} (\omega_\lambda \,.\, \rho_{s,b}) \quad (4.2.1.10)$$

no qual, ω são os coeficientes de ponderação sugeridos por Allen *et al.* (2007).

Executada essas etapas, calcularam-se os índices de vegetação $IVDN$, $IVAS$ e IAF. Os valores do $IVDN$ (Eq. 4.2.1.11) variam entre -1 a 1. Entretanto, para alvos terrestres, seus limites inferiores e superiores se estabelecem, comumente, na faixa entre 0 (nenhuma ou baixa cobertura vegetal) a 0,80 (superfícies totalmente ou em sua maior parte vegetadas) (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009).

$$IVDN = \left(\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V}\right) \quad (4.2.1.11)$$

onde, ρ_{IV} é a reflectância monocromática no infravermelho próximo; ρ_V a reflectância monocromática no vermelho.

O $IVAS$ (Eq. 4.2.1.12) busca amenizar a influência espectral do sombreamento do solo.

$$IVAS = \frac{(1+L).(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (4.2.1.12)$$

no qual, L representa o valor definido pela altura (m) média da vegetação, sendo: 0,25 (vegetação densa), 0,5 (vegetação intermediária) e 1 (pouca vegetação). Neste

estudo, optou-se pelo 0,1, pois de acordo com Silva (2009) tem apresentado bons resultados.

A razão entre a área foliar do dossel da planta por unidade de área ocupada no terreno (*IAF,* $m^2\ m^{-2}$) foi calculada por meio da Eq. 4.2.1.13:

$$IAF = -\frac{ln\left(\frac{0{,}69-IVAS}{0{,}59}\right)}{0{,}91} \quad (4.2.1.13)$$

Para obtenção da emissividade da superfície (Equações 4.2.1.14 e 4.2.1.15), há necessidade de ajustar os valores a duas faixas do espectro térmico. A primeira estreita (ε_{NB}) ($10{,}4 - 12{,}5\mu m$), enquanto a segunda ampla (ε_o) ($5{-}50\mu m$).

$$\varepsilon_{NB} = \varepsilon_o = 0{,}98, \text{ para } IAF > 3 \quad (4.2.1.14)$$

para $IVDN > 0$ e $IAF < 3$, aplicar:

$$\varepsilon_{NB} = 0{,}97 + 0{,}0033 * IAF \quad (4.2.1.14)$$

$$\varepsilon_o = 0{,}95 + 0{,}01 * IAF \quad (4.2.1.15)$$

Calculou-se a T_s por meio da expressão de Planck invertida (Eq. 4.2.1.16), válida para um corpo negro.

$$T_s = \frac{K_2}{ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}.K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (4.2.1.16)$$

onde K_1e K_2 são constantes de radiação específicas da banda do termal para os sensores *TM e ETM+* do *LANDSAT*, extraídas de Allen *et al.* (2002).

Obteve-se a $R_{L\uparrow}$ pela equação de Stefan-Boltzmann (4.2.1.17):

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 . \sigma . T_s^4 \quad (4.2.1.17)$$

sendo que, σ representa a constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67.10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$); T_s corresponde a temperatura de superfície.

O fluxo de radiação solar global que atinge a superfície terrestre ($R_{s\downarrow}$) foi calculado pela Eq. 4.2.1.18:

$$R_{s\downarrow} = S . cos\, Z\, . d_r . \tau_{sw} \quad (4.2.1.18)$$

na qual S corresponde a constante solar ($1367\, W\ m^{-2}$), τ_{sw} (Eq. 4.2.1.19) é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, que representa os

efeitos de absorção e espalhamento advindos dos componentes ou materiais suspensos na atmosfera (ALLEN *et al.*, 2002). Segundo Gomes (2009), essa expressão permite a correção mais apurada das transmissividades dos fluxos radioativos que ingressam na atmosfera e se deslocam em direção à superfície.

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 * exp * \left[\frac{-0.00146*P}{K_t*cosZ} - 0.075 * \left(\frac{W}{cosZ}\right)^{0.4}\right] \quad (4.2.1.19)$$

Posteriormente, executou-se o cálculo da $R_{L\downarrow}$ (Eq. 4.2.1.20):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a . \sigma . T_s^4 \quad (4.2.1.20)$$

onde, ε_a é a emissividade atmosférica, segundo a Eq. 4.2.1.21 proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\varepsilon_a = 0{,}85(-ln . \tau_{sw})^{0{,}09} \quad (4.2.1.21)$$

Finalmente, calculou-se o Rn por meio da Eq. 4.2.1.22. Folhes (2007) destaca que o saldo entre a radiação que incide sobre a superfície (ondas curta e longa) e que dela emerge representa a quantidade disponível para o aquecimento da atmosfera, solo, água, bem como, dos fatores inerentes ao processo de ET.

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha_s R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) . R_{L\downarrow} \quad (4.2.1.22)$$

Com essas etapas concluídas, seguiu-se para o cálculo do G (Eq. 4.2.1.23). Foram utilizados os parâmetros formulados por Bastiaanssen (2000).

$$G = \left[\frac{T_s - 273{,}15}{\alpha_s}(0{,}0038\alpha_s + 0{,}0074{\alpha_s}^2)(1 - 0{,}98 . IVDN^4)\right] Rn \quad (4.2.1.23)$$

Allen *et al.* (2002) sugeriram que, para corpos hídricos, G correspondesse a 50% de Rn. Contudo, adotou-se o critério proposto por Silva e Bezerra (2006) (30% de Rn), por entender que as características dos corpos hídricos são mais condizentes a este estudo. Dessa forma, para $IVDN$ < 0 aplicou-se a Eq. 4.2.1.24:

$$G = 0.3 * Rn \quad (4.2.1.24)$$

Posteriormente, executaram-se os procedimentos para aquisição do H. No *SEBAL/METRIC*, sua estimativa é realizada pela relação linear entre os valores extremos de temperatura de superfície, que definem o gradiente de temperatura (dT). Para isso, são selecionados os pixels âncoras frio e quente, que servem de

referência ou parâmetro para a extrapolação dos valores a toda a área. Os pixels frios foram obtidos em corpos d'água ou cultivos agrícolas irrigados em estágio avançado de desenvolvimento. Adquiriram-se os pixels quentes em áreas de solo exposto preparadas para o cultivo. Os pixels âncoras selecionados para cada imagem podem ser observados no Quadro 4.2.1.1.

Quadro 4.2.1.1. Localização e valores dos pixels âncoras selecionados

Variáveis	**Áreas**					
	Bahia	**Goiás\ Brasília**	**Minas Gerais**	**Fronteira Oeste-RS**	**Região Central-RS**	**Extremo Sul-RS**
	Localização					
Longitude	-45,361	-47,480	-46,689	-56,523	-53,455	-53,010
Latitude	-12,222	-15,919	-16,818	-29,923	-30,083	-33,458
	Pixel Frio					
$Ts\ (°K)$	293,0	288,7	291,6	296,6	295,1	290,9
	Pixel Quente					
$Ts\ (°K)$	311,7	307,4	307,0	310,6	312,1	309,4
$Rn\ (W\ m^{-2})$	351,0	334,0	337,0	495,0	442,0	561,0
$G\ \ (W\ m^{-2})$	66,0	55,0	58,0	94,0	81,0	98,0
$r_{ah}\ (m\ s^{-1})$	91,0	37,0	67,0	37,0	63,0	46,0

Dessa forma, assume-se que H_{frio} e LE_{quente} são iguais a zero, enquanto H_{quente} é obtido pela Eq. 4.2.1.25:

$$H_{quente} = Rn - G = \frac{\rho * C_p * (a + b * T_s)}{r_{ah}} \quad (4.2.1.25)$$

na qual, a e b são incógnitas do sistema de Equações 4.2.1.26 e 4.2.1.27, utilizado para o cálculo do gradiente de temperatura (Eq. 4.2.1.28); r_{ah} é a resistência aerodinâmica inicial (m: s^{-1}), cuja expressão pode ser visualizada na Eq. 4.2.1.29:

$$a + b * T_s = 0 \quad (4.2.1.26)$$

$$a + b * T_s = \frac{r_{ah} * (Rn - G)}{\rho * C_p} \quad (4.2.1.27)$$

$$dT = a + bT_s \quad (4.2.1.28)$$

$$r_{ah} = \frac{ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* . k} \quad (4.2.1.29)$$

onde z_1 e z_2 são os níveis de altura acima da superfície do solo, sendo 0,1 e 2,0m respectivamente; K é a constante de Von Karman; u_* é a velocidade de fricção (m:

s^{-1}) obtida com base nos dados das estações ou torres micrometeorológicas, conforme Eq. 4.2.1.30:

$$u_* = \frac{K.u_x}{ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (4.2.1.30)$$

sendo, u_x a média da velocidade do vento (m: s^{-1}) no dia e hora da aquisição da imagem; Z_x a altura em que os dados de velocidade do vento foram medidos (m); z_{0m} o coeficiente de rugosidade (m), obtido em função da altura média da vegetação (h: m), de acordo com a Eq. 4.2.1.31:

$$z_{0m} = 0{,}12.h \quad (4.2.1.31)$$

A partir do conhecimento da velocidade de fricção na altura em que foi medida a velocidade do vento, pode-se estimá-la a diferentes níveis acima da superfície do solo pela função logarítmica da elevação (Eq. 4.2.1.32). Nesse estudo optou-se pela a altura de 100 (u_{100}: $m\ s^{-1}$), considerando que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, e as condições atmosféricas se encontram em equilíbrio neutro.

$$u_{100} = u_*.\frac{ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)}{k} \quad (4.2.1.32)$$

Com o término desse processo, utilizou-se o perfil logaritmo do vento (Eq. 4.2.1.32) para determinar a velocidade de fricção de cada pixel na imagem, conforme Eq. 4.2.1.33:

$$u_* = \frac{k.u_{100}}{ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \quad (4.2.1.33)$$

sendo, z_{0m} (Eq. 4.2.1.34) obtido em função de $IVAS$ e parâmetros calibrados por Bastiaanssen (2000).

$$z_{0m} = exp(-5{,}809 + 5{,}62.IVAS) \quad (4.2.1.34)$$

Por fim, obteve-se o H por meio da Eq. 4.2.1.35:

$$H = \rho.C_p.\left(\frac{dT}{r_{ah}}\right) \quad (4.2.1.35)$$

Contudo, este H representa as condições iniciais, na qual supõe-se que a atmosfera se encontra em equilíbrio neutro. Para se atingir as condições reais, os valores precisam ser ajustados por meio de um processo iterativo, no qual, primeiramente, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov ($L: m$) (Eq. 4.2.1.36). Esta descreve um perfil mais geral da velocidade vertical do vento, levando em consideração os efeitos da rugosidade de superfície e, consequentemente, dos fluxos turbulentos atuantes (FOLHES, 2007).

$$L = -\frac{\rho.C_p.u_*^3.T_S}{k.g.H} \quad (4.2.1.36)$$

sendo, g (9,81$m: s^{-2}$) o módulo do campo gravitacional terrestre.

Como os valores de L foram menores que zero (atmosfera instável), aplicou-se a seguinte sequência de Equações: 4.2.1.37, 4.2.1.38, 4.2.1.39, 4.2.1.40, 4.2.1.41 e 4.2.1.42. Estas consideram o transporte de momentum (Ψ_m) e de calor (Ψ_h) em diferentes níveis de altitude, de acordo com as formulações de Paulson e Webb (1970) apud Allen *et al.* (2002):

$$X_{(100m)} = \left(1 - 16\frac{100}{L}\right)^{0,25} \quad (4.2.1.37)$$

$$\Psi_{m(100m)} = 2ln.\left(\frac{1+x_{(100m)}}{2}\right) + ln\left(\frac{1+x_{(100m)}^2}{2}\right) - 2arctg\left(x_{(100m)}\right) + 0,5.\pi \quad (4.2.1.38)$$

$$X_{(2m)} = \left(1 - 16\frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (4.2.1.39)$$

$$\Psi_{h(2m)} = 2ln\left(\frac{1+x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (4.2.1.40)$$

$$X_{(0,1m)} = \left(1 - 16\frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (4.2.1.41)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2ln\left(\frac{1+x_{(0,1)}^2}{2}\right) \quad (4.2.1.42)$$

Finalmente, calculou-se a u_* (Eq. 4.2.1.43) e a r_{ah} (Eq. 4.2.1.44) corrigidas:

$$u_* = \frac{u_{100}.k}{ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right) - \Psi_{m(100m)}} \quad (4.2.1.43)$$

$$r_{ah} = \frac{ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(2m)} + \Psi_{h(0,1m)}}{u_*.k} \quad (4.2.1.44)$$

Realizado todos os passos, retornou-se ao sistema de equações com duas incógnitas (4.2.1.26 e 4.2.1.27) com r_{ah} corrigida, a fim de estabelecer novos valores para dT (Eq. 4.2.1.28). Nas Equações 4.2.1.35 e 4.2.1.36, substitui-se as imagens de u_* e r_{ah} pelas corrigidas na etapa anterior. Esse processo (Figura 4.2.1.1) foi executado até que os valores atingissem a estabilidade.

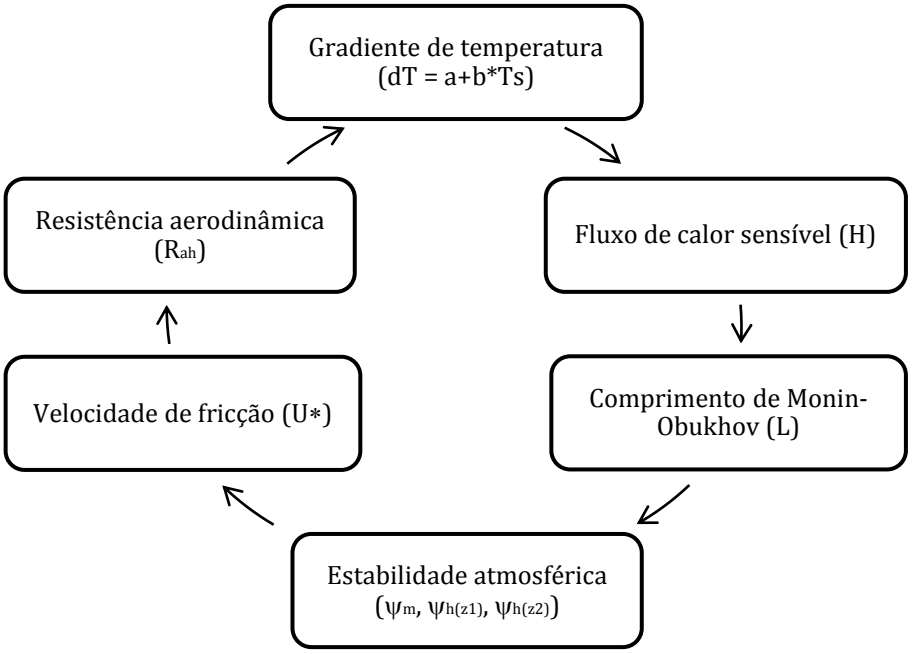


Figura 4.2.1.1. Fluxograma do processo de estabilização dos valores para cada pixel na imagem.

Como destacado, o *SEBAL/METRIC* utiliza o residual da equação do BE para estimar o LE (Eq. 4.2.1.45), que representa o fluxo de vapor d'água que ingressa na atmosfera sob a forma de calor latente.

$$LE = Rn - G - H \tag{4.2.1.45}$$

Com os valores de LE para cada pixel na imagem é possível convertê-los para ETR_h (Eq. 4.2.1.46):

$$ET_h = 3600.\frac{LE}{\lambda} \tag{4.2.1.46}$$

onde, λ representa o calor latente de vaporização da água ($J\ kg^{-1}$), adquirido pela Eq. 4.2.1.47:

$$\lambda = (2{,}501 - 0{,}00236 * (Tar - 273) * 10^6 \tag{4.2.1.47}$$

Posteriormente, obteve-se a FE (Eq. 4.2.1.48), que corresponde à fração da energia disponível ao LE. Em outras palavras, quanto maior o valor dessa variável maior será a quantidade de energia utilizada nos processos de transferência de água da superfície terrestre para a atmosfera (MOURA *et al.*, 2002).

$$FE = \left(\frac{LE}{Rn-G}\right) \quad (4.2.1.48)$$

Em situações de céu claro, admite-se que os valores da FE são constantes e regulares durante o dia. Por isso, podem ser extrapolados para valores médios diurnos, possibilitando a estimativa da ET_d (Eq. 4.2.1.49):

$$ET_d = \frac{86400.FE.Rn_{24h}}{\lambda} \quad (4.2.1.49)$$

em que, Rn_{24h} representa o saldo de radiação diário, estimado por meio da Eq. 4.2.1.50, citada por De Bruin (1987).

$$Rn_{24h} = (1-\alpha) * R_{s24h} - a * \tau_{sw24h} \quad (4.2.1.50)$$

no qual, R_{s24h} ($W\ m^{-2}$) corresponde a radiação global diária obtida pela média da radiação observada na estação meteorológica; a é o coeficiente de regressão entre o saldo de radiação de onda longa e a transmissividade atmosférica média diária (τ_{sw24h}: Eq. 4.2.1.51), sendo 143 (TEIXEIRA *et al.*, 2009a) para as áreas de clima tropical, e 110 (BASTIAANSSEN, 2000) para as áreas de clima subtropical.

$$\tau_{sw24h} = \frac{R_{s24h}}{R_{s24h\ toa}} \quad (4.2.1.51)$$

onde $R_{s24h\ toa}$ representa a radiação global diária no topo da atmosfera obtida com base nos dados das estações meteorológicas.

4.2.2. Classificação do uso e cobertura da terra

A classificação do uso e cobertura da terra foi realizada por meio de um processo automático. Primeiramente, executou-se o método de segmentação por crescimento de regiões e, posteriormente, aplicou-se o algoritmo de classificação ISOSEG, com limiar de aceitação de 75% e cinco iterações. A segmentação por crescimento de regiões consiste no agrupamento de pixels contíguos que

estabelecem uniformidade espectral e relação espacial de vizinhança (INPE, 2004). Para delimitação das regiões foram selecionadas os valores contidos nos comprimentos de onda do visível, infravermelho-próximo, médio e distante (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7), assim como, limiar de aceitação 1 e o número mínimo de 40 pixels.

As regiões segmentadas, extraídas no processo anterior, serviram de base para a definição das classes de usos pelo classificador ISOSEG. Este é um algoritmo de agrupamento aplicado ao conjunto de regiões que apresentaram similaridade em seus atributos estatísticos. Dessa forma, utiliza-se da matriz de covariância e do vetor médio para estimar o valor central de cada classe, por meio da distância de Mahalanobis (D) Eq. (4.2.2.1). A Divisão de Processamento de Imagens do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) (DPI, 2014) afirma que as classes são associadas quando a distância definida pelo limiar de aceitação for inferior à distância de Mahalanobis.

$$D = \frac{1}{2} * (X - m_i)^T * C_i^{-1} * (X - m_j) \quad (4.2.2.1)$$

onde X é a região analisada; m_i e m_j correspondem ao vetor média das classes i e j; T é a matriz transposta; C_i representa a matriz de covariância.

As classes foram definidas em função das propostas metodológicas apresentadas por Anderson *et al.* (1979) e IBGE (2006), e nas características dos usos da terra na área de estudo. Nas áreas de clima tropical, os cerrados e pastagens, bem como, matas ciliares e cerradão foram agrupadas em uma mesma classe devido à similaridade espectral desses usos, impossibilitando a separação. Esse mesmo problema ocorreu nas áreas subtropicais com os usos campo e pastagens, assim como, matas nativas e florestamento. As classes comuns a ambos os tipos climáticos e suas características são apresentados no Quadro 4.2.2.1, enquanto que os específicos das áreas de clima tropical e subtropical podem ser observados nos Quadros 4.2.2.2 e 4.2.2.3, respectivamente.

Para avaliação da classificação foi realizada a construção da matriz de erros ou confusão. Usualmente, a matriz de erros é elaborada a partir das amostras de treinamento e dos parâmetros estatísticos que avaliam as suas similaridades espectrais. Logo, os resultados se referem às amostras coletadas e não aos obtidos no processo de classificação. Nesse estudo, a matriz foi construída com base no resultado propriamente dito, ou seja, a imagem classificada. Para isso, utilizou-se a

Quadro 4.2.2.1. Classes de uso e cobertura da terra comuns aos diferentes tipos climáticos, bem como, suas características

Uso e cobertura da terra	Características
Água	Açudes; represas; arroios, rios, lagos e corpos d'água costeiros (somente na área do Extremo Sul do RS);
Agricultura Irrigada	Cultivos que necessitam de aplicações artificiais de água ao solo, em intervalos definidos, com o propósito de mantê-los sob as condições de umidade ditas ideias para o seu desenvolvimento;
Agricultura Pousio	Período em que o solo se encontra em repouso para recuperação da fertilidade; áreas revestidas com gramíneas esparsas em diferentes estágios de desenvolvimento;
Área Urbana	Estruturas artificias formadas por construções, edificações e sistema viário; sede dos municípios, onde são desenvolvidas, predominantemente, as atividades de cunho administrativo e de serviços;
Solo Exposto	Áreas desprovidas de cobertura vegetal em razão das etapas de preparo cultural e colheita; também se enquadram as áreas degradadas devido a processos erosivos.

Fonte: Adaptado de Anderson *et al.* (1979) e IBGE (2006).

Quadro 4.2.2.2. Classes de uso e cobertura da terra presentes somente nas áreas de clima tropical e suas características

Uso e cobertura da terra	Características
Cerrado/Pastagens	Savana arborizada; savana gramínea lenhosa; áreas cobertas por gramíneas naturais e plantadas;
Mata Ciliar/Cerradão	Vegetação no entorno dos corpos hídricos; savana florestal; capoeira e capoeirões; formações florestais secundárias arbustivas.

Fonte: Adaptado de Anderson *et al.* (1979) e IBGE (2006).

Quadro 4.2.2.3. Classes de uso e cobertura da terra presentes somente nas áreas de clima subtropical e suas características

Uso e cobertura da terra	Características
Agricultura Sequeiro	Destinada ao cultivo de plantas que não necessitam de aplicações constantes, em intervalos definidos, de água, pois o ciclo vegetativo, bem como, os tratos culturais são realizados nos períodos em que as chuvas atendem as necessidades de umidade;
Banhado	Vegetação típica de ambientes alagadiços e campestres; localizam-se em terrenos baixos e planos, constantemente encharcados, com lençol freático muito próximo a superfície em boa parte do ano;
Campo/Pastagens	Estepe arborizada; vegetação herbácea e subarbustiva; áreas cobertas por gramíneas naturais e plantadas;
Dunas	Depósitos arenosos localizados ao longo da linha de costa, retrabalhados por processos fluviais intercontinentais, marítimos e dinâmica dos ventos;
Mata Nativa/Florestamento	Conjunto de estrutura florestal e campestre; matas ciliares; capoeira; capoeirões; espécies florestais nativas e implantadas.

Fonte: Adaptado de Anderson *et al.* (1979) e IBGE (2006).

extensão *Accuracy Assessment* do aplicativo ERDAS IMAGINE 9.1®, no qual é possível distribuir, aleatoriamente, determinado número de amostras sobre a imagem e, posteriormente, atribuir a cada um desses pontos o uso correto. Coletaram-se 1000 amostras com o valor mínimo de vinte para cada classe de uso e cobertura da terra. Posteriormente, a matriz originada possibilitou o cálculo do coeficiente Kappa[1] (K) e desempenho geral[2] (DG), conforme demonstrados nas Equações 4.2.2.2 e 4.2.2.3, respectivamente.

$$K = \frac{DG - Q}{1 - Q} \tag{4.2.2.2}$$

$$DG = \frac{DP}{T} \tag{4.2.2.3}$$

sendo, DP os elementos da diagonal principal (classificados corretamente); T número total de amostras; Q percentual dos acertos ocorridos ao acaso, dada pela Eq. 4.2.2.4:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{c} X_{i+} * X_{+i}}{T^2} \tag{4.2.2.4}$$

onde X_{i+} é a quantidade total das amostras na linha correspondente a categoria informacional; X_{+i} representa quantidade total das amostras na coluna correspondente a categoria informacional.

[1] O coeficiente Kappa representa uma medida de concordância real entre as amostras, a partir da análise multivariada discreta utilizada na avaliação da precisão temática (SANTOS *et al.*, 2010). Quanto mais próximo a 1, ou seja, 100%, maior a correlação ou confiabilidade no processo de classificação.

[2] Percentual das amostras classificadas corretamente.

5. Resultados e discussão

5.1. Validação dos resultados

As distintas torres micrometeorológicas apresentaram, comparando-se os dados horários, variações por volta de 200 $W\ m^{-2}$ no comportamento de Rn, o que está de acordo com as taxas de incidência solar referente aos períodos analisados, ou seja, inverno nas áreas de clima tropical e verão nas subtropicais. As demais variáveis do BE não demonstraram um padrão senoidal característico, com oscilações acentuadas, principalmente, entre as 10 e 14 horas. O comportamento das variáveis do BE nos respectivos dias de aquisição das imagens, bem como, os resultados instantâneos obtidos pelo *SEBAL*, são apresentados nas Figuras 5.1.1A (Brasília) e 5.1.1B (Paraíso do Sul).

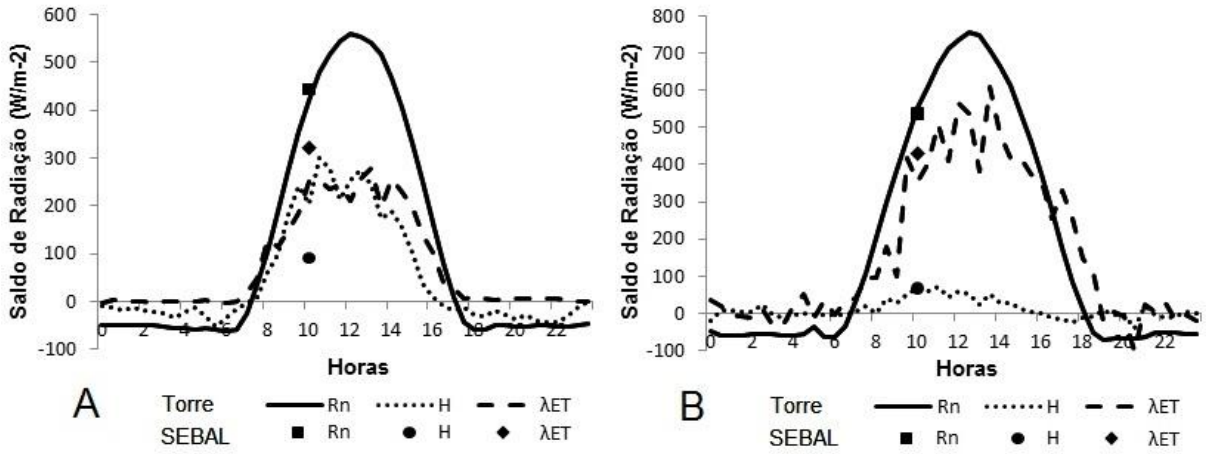


Figura 5.1.1. Comparativo entre o comportamento das variáveis do BE nas torres micrometeorológicas de Brasília (A) e Paraíso do Sul (B) nos dias correspondentes a aquisição da imagem.

Nos Quadros 5.1.1 e 5.1.2, observam-se os valores estimados pelo algoritmo no momento da passagem do satélite e os observados nas torres de Brasília e Paraíso do Sul, assim como, seus respectivos erros absolutos e relativos.

Os dados do *SEBAL/METRIC* foram superestimados em praticamente todas as variáveis, com exceções do H e R_{s24h} na torre de Brasília, bem como, Rn e Rn_{24h} em Paraíso do Sul. Destacam-se as baixas discordâncias no Rn (5,4% e -2,9%) e consequentemente Rn_{24h} (3,6% e -4,9%). Bezerra (2006) obteve diferença relativa similar (9,82%). Folhes (2007) afirma que erros absolutos dessa magnitude se

Quadro 5.1.1. Estimativas, valores observados e resultados da validação das variáveis do BE e ET na torre micrometeorológica de Brasília

Variável	Estimado	Observado	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
$Rn\ (W\ m^{-2})$	444	421	23	5,4
$R_{s24h}\ (W\ m^{-2})$	219	203	-16	-7,3
$Rn_{24h}\ (W\ m^{-2})$	111	115	4	3,6
$G\ (W\ m^{-2})$	32	5	27	515,0
$H\ (W\ m^{-2})$	91	204	-113	-55,2
$LE\ (W\ m^{-2})$	321	252	69	27,6
$ET_h\ (mm)$	0,47	0,37	0,10	26,7
FE	0,78	0,60	0,17	28,8
$ET_d\ (mm)$	2,92	2,68	0,24	9,1

Quadro 5.1.2. Estimativas, valores observados e resultados da validação das variáveis do BE e ET na torre micrometeorológica de Paraíso do Sul

Variável	Estimado	Observado	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
$Rn\ (W\ m^{-2})$	537	553	-16	-2,9
$Rn_{24h}\ (W\ m^{-2})$	182	191	-9	-4,9
$G\ (W\ m^{-2})$	38	-12	50	-425,8
$H\ (W\ m^{-2})$	69	66	3	5,0
$LE\ (W\ m^{-2})$	430	354	76	21,4
$ET_h\ (mm)$	0,63	0,52	0,11	21,4
FE	0,86	0,63	0,23	37,3
$ET_d\ (mm)$	5,80	5,77	0,03	0,5

encontram abaixo dos comumente adquiridos na literatura, que variam entre 30 a 60 $W\ m^{-2}$.

Entretanto, no G os erros foram elevados nas duas áreas de estudo. Giongo (2011) destaca a dificuldade de se estimar e detectar, por dados radiométricos, os fluxos em profundidade, sendo comuns, portanto, erros dessa natureza. Folhes (2007) obteve diferença relativa de 227% e superestimava média de 30 $W\ m^{-2}$. O autor creditou essa discrepância à influência da umidade do solo, tendo em vista que as placas de fluxo de calor foram instaladas próximas aos gotejadores. Isso também pode ter influenciado no resultado adquirido em Paraíso do Sul, pois os sensores se encontravam em uma lavoura de arroz (SANTOS, 2009).

No H ocorreram diferenças significativas quanto aos erros encontrados nas distintas áreas de estudo. Enquanto em Brasília obteve-se subestimativa absoluta de -113 $W\ m^{-2}$ e relativa de -55,3%, em Paraíso do Sul, observou-se superestimativa de 3 $W\ m^{-2}$ e 5,0%. Ruhoff (2011) afirma que no H estão inseridos grande parte dos erros gerados pelo algoritmo. Isso se deve às incertezas e simplificações

introduzidas nos cálculo de rugosidade de superfície, resistência aerodinâmica, entre outros.

No LE os erros também foram elevados, entretanto bem abaixo dos obtidos no H em Brasília e G em ambas as torres. Folhes (2007) destaca que diferenças dessa natureza são recorrentes na estimativa de LE, em razão do fechamento forçado do BE no método das correlações turbulentas e dos erros associados à estimativa das demais variáveis.

As discrepâncias ocorridas em ET_h e FE se aproximaram às encontradas em LE, o que está de acordo diante da relação intrínseca existente entre essas variáveis. Segundo Ruhoff (2011) os erros comumente encontrados em FE se devem as subestimativas dos fluxos turbulentos e do BE no sistema de correlações turbulentas.

Na estimativa da ET_d os erros relativos foram inferiores a 10%. Esse resultado está em conformidade com o observado por Bezerra (2006) que obteve 8,1%. Além disso, foram melhores que os encontrados por Folhes (2007) (12%). Mesmo com as discrepâncias obtidas em algumas variáveis do BE, deve-se ressaltar a habilidade do algoritmo em estimar a ET_d em diferentes condições climáticas e de uso e cobertura da terra, o que de certa forma, garante a confiabilidade espacial dos dados.

5.2. Áreas de clima Tropical

5.2.1. Uso e cobertura da terra

Nas áreas de clima tropical, a vegetação nativa é composta pelos remanescentes de cerrado e suas variações fisionômicas (altura e densidade). Classificam-se como: campos limpos (até 0,5m), campos sujos (até 2m), campos cerrados (até 5m), cerrados (até 10m) e cerradão (acima de 10m) (BATALHA, 1997). Além disso, têm-se as matas ciliares, que se distribuem ao longo dos cursos d'água, em terrenos relativamente férteis e sem déficit hídrico, compondo de forma significativa a vegetação nativa das áreas selecionadas. No entanto, segundo o IBGE (2004), as áreas de cerrados foram significativamente devastadas para a implantação de atividades econômicas, principalmente agropecuária. Esse processo

mostrou-se bem característico na área da Bahia, na qual a Agricultura Pousio obteve 43,3%. No momento da aquisição da imagem se encontravam expostas ou com vegetação rasteira em desenvolvimento, fruto da colheita da soja de verão. Nas Figuras 5.2.1.1, 5.2.1.2 e 5.2.1.3, visualizam-se as distribuições espaciais dos usos e coberturas da terra nas áreas selecionadas, bem como, suas quantificações em hectares e representatividade percentual.

Os coeficientes Kappa e desempenho geral para todos os usos foram de 0,60 e 70,3 % (Bahia); 0,65 e 74,5 % (Goiás/Brasília); 0,63 e 73,0 % (Minas Gerais). Visualizam-se as respectivas matrizes de erros nos Quadros 5.2.1.1, 5.2.1.2 e 5.2.1.3.

Individualmente, a classe Agricultura Irrigada apresentou os maiores coeficientes Kappa, ou seja, 1,0 (Bahia), 0,93 (Goiás/Brasília) e 0,89 (Minas Gerais). As elevadas acurácias do usuário[3] (100%) e do produtor (86,3%) na área Bahia são creditadas às relativas porcentagens de ocupação da classe Agricultura Pousio. A resposta espectral desta é bastante distinta das áreas classificadas como Agricultura Irrigada, o que facilita o processo de separação pelo classificador. Em Goiás/Brasília a acurácia do usuário foi de 94,1%, enquanto que do produtor 84,2%, havendo poucos erros de inclusão com as classes Mata Ciliar/Cerradão e Solo Exposto. Em Minas Gerais, obteve-se o menor desempenho se comparado às demais áreas, tanto para a acurácia do usuário (89,9%) quanto para a do produtor (83,0%). Isso se deve, em parte, ao registro de chuva no décimo dia anterior à passagem do satélite, o que pode ter aumentado a semelhança espectral com as matas ciliares, cerradão e cerrado.

Na Bahia, obteve-se elevado coeficiente Kappa para a classe Área Urbana Bahia (0,96). Contudo, em Goiás/Brasília, encontrou-se apenas 0,68. Apesar de baixo, superior ao observado na área (0,60). Atribui-se a significativa diferença entre os índices à ocupação desse uso em suas respectivas áreas de estudo.

Para Agricultura Pousio, Goiás/Brasília adquiriu coeficiente Kappa 1,0. Contudo, na Bahia (0,47) e Minas Gerais (0,49) os índices foram menores que os encontrados nas respectivas áreas, ou seja, 0,6 e 0,63. Assim como na Área

[3] As acurácias do usuário e produtor correspondem à porcentagem dos pixels classificados corretamente, em função do número total de amostras coletadas. As porcentagens restantes representam os pixels em que ocorreram erros de inclusão (usuário) e omissão (produtor).

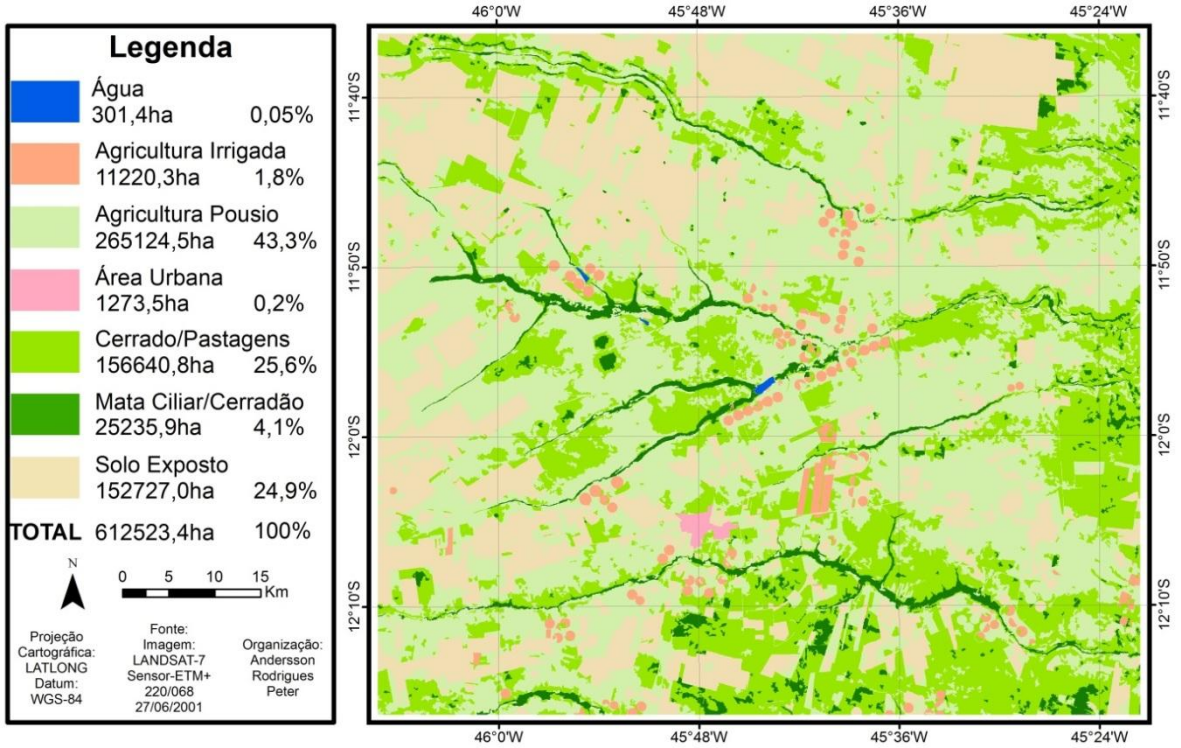


Figura 5.2.1.1. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Bahia em 27 de junho de 2001.

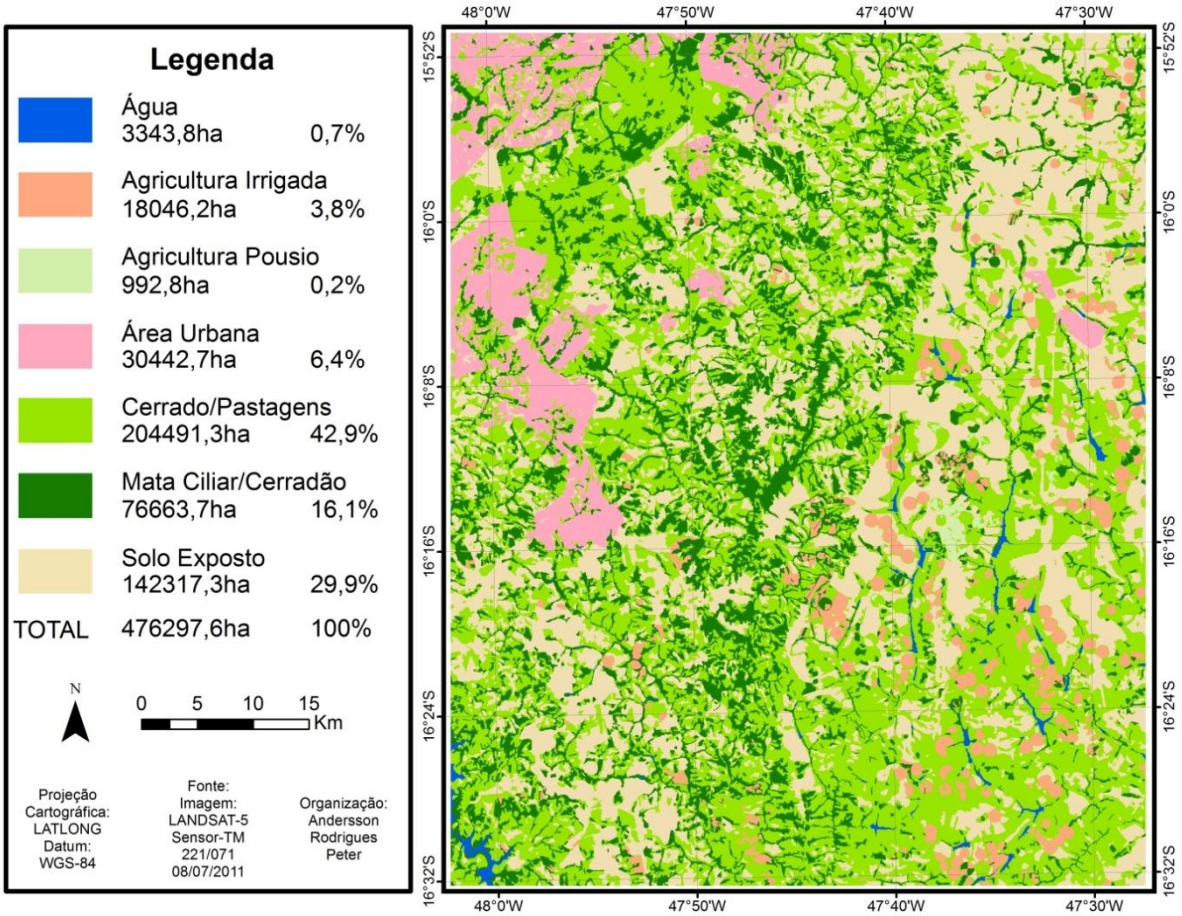


Figura 5.2.1.2. Mapa de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília em 08 de julho de 2011.

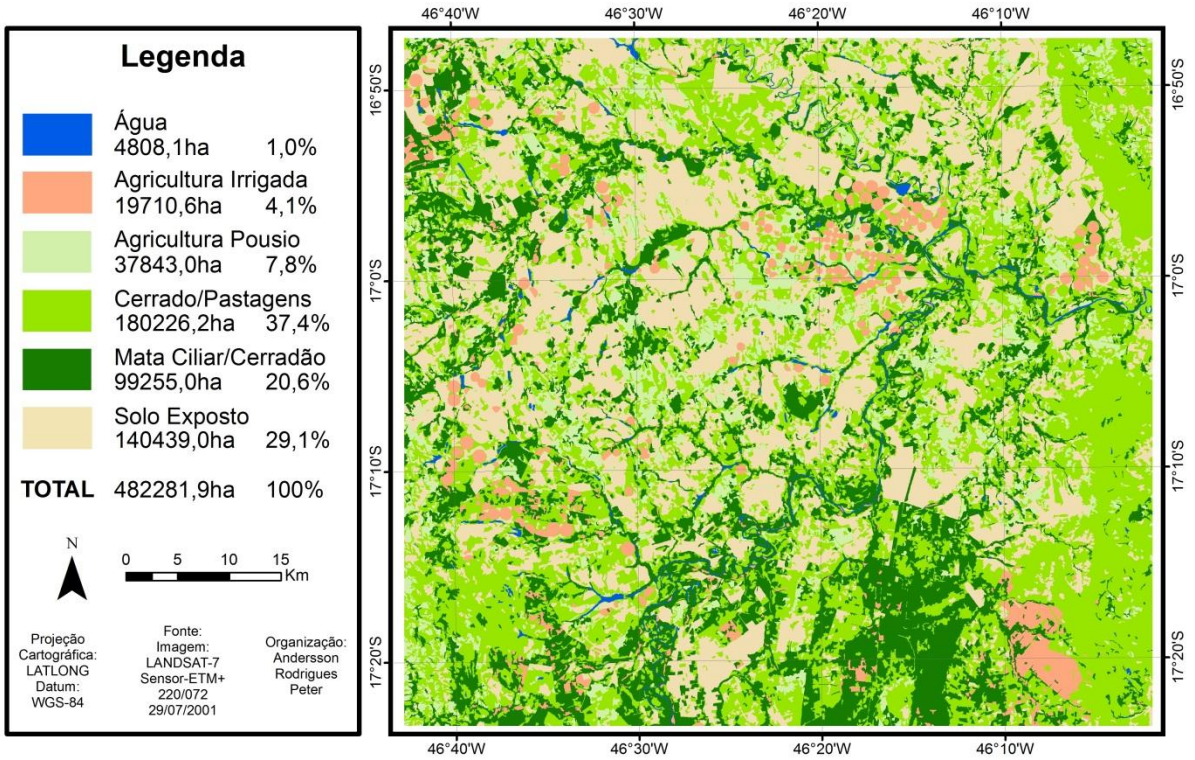


Figura 5.2.1.3. Mapa de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais em 29 de julho de 2001.

Urbana, esse contraste pode ser creditado à representatividade de ocupação da classe em cada área de estudo, visto que Goiás/Brasília obteve apenas 0,2%.

Na classe Água os coeficientes Kappa na Bahia (0,86) e Goiás/Brasília (0,74) foram superiores aos obtidos nas respectivas áreas (0,6 e 0,65). A exceção ocorreu em Minas Gerais (0,63) que apresentou apenas 0,24. Neste caso, atribui-se a inserção errônea dos pixels localizados nas margens dos açudes e lagoas como o principal responsável pelo baixo índice encontrado.

As demais classes foram analisadas concomitantemente devido à relação mútua dos erros de inclusão e omissão, principalmente entre Mata Ciliar/Cerradão com Cerrado/Pastagens, e esta com Solo Exposto. Mesmo com distintas funções ambientais, apresentaram coeficientes Kappa similares, com variações entre 0,46 a 0,78. Além disso, as classes que teoricamente deveriam apresentar respostas espectrais distintas, como Cerrado/Pastagens e Solo Exposto, demonstraram certa semelhança, principalmente nas áreas em que os cerrados se encontravam nos estágios iniciais de desenvolvimento.

Em suma, destacam-se os elevados coeficientes Kappa e desempenhos gerais na classe Agricultura Irrigada nas três áreas, bem como, a confusão espectral esperada entre as classes de Agricultura Pousio, Mata Ciliar/Cerradão,

Quadro 5.2.1.1. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Bahia

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Agricultura Pousio	Área Urbana	Cerrado/Pastagens	Mata Ciliar/Cerradão	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	26	0	4	0	0	0	0	30	13,3%
Agricultura Irrigada	0	44	0	0	0	0	0	44	0,0%
Agricultura Pousio	0	4	247	0	103	10	9	373	33,8%
Área Urbana	0	0	0	30	0	0	1	31	3,2%
Cerrado/Pastagens	0	1	18	0	199	11	4	233	14,6%
Mata Ciliar/Cerradão	0	0	1	0	26	35	0	62	43,6%
Solo Exposto	0	2	93	0	10	0	122	227	46,3%
Total	26	51	263	30	338	56	136	1000	
% Erros de omissão	0,0%	13,7%	32,0%	0,0%	41,1%	37,5%	10,3%		

Quadro 5.2.1.2. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Agricultura Pousio	Área Urbana	Cerrado/Pastagens	Mata Ciliar/Cerradão	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	18	0	0	0	5	1	0	24	25,0%
Agricultura Irrigada	0	48	1	0	0	1	1	51	5,9%
Agricultura Pousio	0	0	20	0	0	0	0	20	0,0%
Área Urbana	0	0	0	52	17	1	4	52	29,7%
Cerrado/Pastagens	0	4	8	2	296	27	56	393	24,7%
Mata Ciliar/Cerradão	0	3	0	1	30	125	0	159	21,4%
Solo Exposto	0	2	8	5	74	4	186	279	33,3%
Total	18	57	37	60	422	159	247	1000	
% Erros de omissão	0,0%	15,8%	45,9%	13,3%	29,9%	21,4%	24,7%	-	

Quadro 5.2.1.3. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Agricultura Pousio	Cerrado/Pastagens	Mata Ciliar/Cerradão	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	5	0	0	1	14	0	20	75,0%
Agricultura Irrigada	0	44	0	0	5	0	49	10,2%
Agricultura Pousio	0	0	46	36	0	2	84	45,2%
Cerrado/Pastagens	0	2	31	277	23	28	361	23,3%
Mata Ciliar/Cerradão	0	7	2	48	146	0	203	28,1%
Solo Exposto	0	0	23	48	0	212	283	25,1%
Total	5	53	102	410	188	242	1000	
% Erros de omissão	0,0%	17,0%	54,9%	32,4%	22,3%	12,4%	-	

Cerrado/Pastagens e Solo Exposto. Apesar dos erros observados, percebe-se que o classificador apresentou desempenho geral satisfatório no processo de classificação, tendo em vista que os índices foram superiores a 70,0%. Sendo assim, a técnica de classificação empregada possibilitou a diferenciação das classes com distintas funções ambientais, gerando, consequentemente, os polígonos para a análise das variáveis do BE e ETR_d em diferentes condições de uso e cobertura da terra.

5.2.2. Balanço de energia

Os Quadros 5.2.2.1, 5.2.2.2 e 5.2.2.3 apresentam o valor médio das variáveis do BE para cada classe de uso e cobertura da terra.

Quadro 5.2.2.1. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Bahia

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	546	95	30	420	0,93
Área Urbana	396	60	141	194	0,58
Agricultura Irrigada	445	25	59	361	0,86
Agricultura Pousio	439	55	105	282	0,73
Cerrado/Pastagens	459	46	87	330	0,79
Mata Ciliar/Cerradão	483	33	60	390	0,87
Solo Exposto	385	63	167	156	0,48

Quadro 5.2.2.2. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	485	62	54	370	0,87
Área Urbana	382	48	163	170	0,51
Agricultura Irrigada	408	19	78	311	0,80
Agricultura Pousio	406	40	115	251	0,68
Cerrado/Pastagens	416	42	122	252	0,67
Mata Ciliar/Cerradão	436	28	100	307	0,75
Solo Exposto	373	48	176	149	0,45

Quadro 5.2.2.3. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	475	66	62	348	0,85
Agricultura Irrigada	415	29	89	297	0,77
Agricultura Pousio	417	50	139	228	0,62
Cerrado/Pastagens	407	49	137	222	0,62
Mata Ciliar/Cerradão	427	41	112	274	0,71
Solo Exposto	373	54	194	125	0,39

Os maiores valores médios de Rn foram observados nas classes Água e Mata Ciliar/Cerradão, com variações entre 427 a 546 $W\ m^{-2}$. A presença de umidade nessas classes contribui para retenção da energia incidente em função dos baixos valores de albedo. Meireles (2007) afirma que o albedo controla as taxas de ondas curtas absorvidas e refletidas pela superfície terrestre, tornando-se um grande modulador do BE. Dessa forma, a saída atenuada da radiação de ondas curtas propicia o aumento dos valores de Rn. Borges (2008) e Bezerra (2009), em estudos realizados no Estado da BA, encontraram resultados semelhantes para classe Água no período seco, pois variaram entre 550 a 570 $W\ m^{-2}$. Em áreas de savana arbórea densa na bacia do rio São Francisco, Nicácio (2008) obteve Rn médio de 490 $W\ m^{-2}$, similar ao adquirido na classe Mata Ciliar/Cerradão nas três áreas de estudo.

As classes Agricultura Irrigada, Agricultura Pousio e Cerrado/Pastagens enquadram os resultados intermediários médios, com variações entre 406 e 459 $W\ m^{-2}$. Esta relativa aproximação e baixa variação podem ser creditadas à semelhança espectral e estrutural da vegetação. Bezerra (2009) e Folhes (2007) em estudos no Estado do Ceará (CE), adquiriram, para Agricultura Irrigada, valores inferiores a 500$W\ m^{-2}$ e média de 551 $W\ m^{-2}$, respectivamente. Nicácio (2008), nesta classe, encontrou valor médio de 452 $W\ m^{-2}$, relativamente próximo dos observados nas três áreas de estudo. Isso também pode ser evidenciado nos usos com savana gramínea lenhosa, já que a autora supracitada obteve média de 476 $W\ m^{-2}$.

Observaram-se os menores valores de Rn nas classes Solo Exposto e Área Urbana, com amplitude média de 373 a 396 $W\ m^{-2}$. Borges (2008) adquiriu, para solo exposto, resultado médio (305 $W\ m^{-2}$) condizente com o intervalo observado nas três áreas de estudo.

No G, os maiores valores absolutos e porcentagens médias em relação ao Rn (G/Rn) foram encontrados na classe Água (62 a 95 $W\ m^{-2}$ e 14 a 17%). Segundo Meireles (2007), o alto calor específico e capacidade de armazenamento da energia são as responsáveis pelos elevados índices registrados nos corpos hídricos. Nicácio (2008) acrescenta que, nos demais usos há forte correlação positiva com a temperatura de superfície. Isso pode ser evidenciado pelos elevados valores adquiridos nas classes Área Urbana e Solo Exposto, com variações entre 48 a

60 $W\ m^{-2}$ e 13 a 16% (G/Rn). Estes percentuais se aproximaram aos adquiridos por Bezerra (2009) para áreas de solo exposto (13 a 17%). Os resultados intermediários (40 a 55 $W\ m^{-2}$ e 10 a 12 %) ocorreram nas classes Agricultura Pousio e Cerrado/Pastagens.

As classes Agricultura Irrigada e Mata Ciliar/Cerradão obtiveram os menores valores de G, com variações entre 19 a 41 $W\ m^{-2}$ e 5 a 10% (G/Rn). Isso ocorre devido à forte correlação negativa com o $NDVI$, que tende a ser alto nos usos com expressiva atividade fotossintética. Bastiaanssen (2000), Chavez *et al.* (2007) e Giongo (2011) encontraram resultados absolutos e relativos semelhantes para cultivos irrigados com alta produção de biomassa, tendo em vista que se enquadraram na faixa de 25 a 40 $W\ m^{-2}$ e 5 a 10% (G/Rn).

No H, Solo Exposto e Área Urbana (141 a 194 $W\ m^{-2}$ e 43 a 52%) enquadraram os maiores valores absolutos e porcentagens médias em relação ao Rn (H/Rn). Menezes (2006), para os mesmos usos, obteve resultados entre 183,95 a 341,98$W\ m^{-2}$. Giongo (2011) afirma que os valores de H são elevados em áreas desprovidas de vegetação devido a forte correlação positiva com a temperatura de superfície e albedo. Sendo assim, as classes Água, Agricultura Irrigada e Mata Ciliar/Cerradão apresentam os menores resultados, com variações entre 30 a 112 $W\ m^{-2}$ e 6 a 20%. Os valores obtidos por Bezerra (2009) em matas ciliares e corpos hídricos se concentraram na faixa de 50 a 150 $W\ m^{-2}$ e 30 a 70 $W\ m^{-2}$, condizentes com o intervalo das três áreas de estudo.

No LE, a classe Água, cuja porcentagem do Rn é predominantemente destinada à evaporação da água (BORGES, 2008), apresentou os maiores valores absolutos (348 a 420 $W\ m^{-2}$) e porcentagens médias em relação ao Rn (LE/Rn) (73 a 77%). Bezerra (2009) obteve resultados aproximados, pois se enquadraram na faixa de 350 a 500 $W\ m^{-2}$. Devido à presença de umidade, as classes Mata Ciliar/Cerradão e Agricultura Irrigada também apresentaram valores absolutos elevados, com variações entre 297 a 390 $W\ m^{-2}$. Além disso, as porcentagens de LE/Rn (64 a 81%) foram maiores que as observadas na classe Água. Bezerra (2009) encontrou resultados absolutos e porcentagens aproximadas para agricultura irrigada (250 a 350 $W\ m^{-2}$ e 60 a 90 %). Nicácio (2008) afirma que valores acentuados nessas classes são esperados devido a maior disponibilidade hídrica armazenada na zona da raiz das matas ciliares e cultivos irrigados.

Os valores intermediários foram adquiridos em Cerrado/Pastagens e Agricultura Pousio, com variações entre 222 a 330 $W\ m^{-2}$ e 55 a 72% (LE/Rn). Por fim, encontraram-se os menores resultados nas classes Área Urbana e Solo Exposto (125 a 194 $W\ m^{-2}$ e 33 a 49% de Rn).

Como destacado por Giongo (2011), a FE está fortemente relacionada com a incidência da radiação como fator energético para a transferência de água à atmosfera (LE), assim como, pela quantidade de água ou umidade presente em determinada superfície. Dessa forma, averiguou-se que nas três áreas de estudo as FEs da classe Agricultura Irrigada ficaram abaixo apenas da classe Água nas respectivas áreas, demonstrando a grande quantidade de recursos hídricos despendido por essa atividade agrícola, principalmente em Goiás/Brasília e Minas Gerais.

5.2.3. Análise da evapotranspiração

Nos Quadros 5.2.3.1, 5.2.3.2 e 5.2.3.3 são apresentados os dados estatísticos de ET_d para cada classe de uso e cobertura da terra.

Quadro 5.2.3.1. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Bahia

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	1,9	4,1	4,4	4,5	0,6	15%
Área Urbana	0,4	1,8	1,8	3,7	0,3	18%
Agricultura Irrigada	1,1	2,9	2,9	3,7	0,3	10%
Agricultura Pousio	0,7	2,6	2,6	4,5	0,3	12%
Cerrado/Pastagens	1,0	2,9	3,0	4,4	0,2	7%
Mata Ciliar/Cerradão	0,6	3,3	3,3	4,4	0,2	6%
Solo Exposto	0,001	1,5	1,5	4,5	0,3	20%

Quadro 5.2.3.2. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área de Goiás/Brasília

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	1,7	3,6	3,7	4,1	0,3	7%
Área Urbana	0,001	1,7	1,7	3,3	0,3	19%
Agricultura Irrigada	1,2	2,6	2,6	3,7	0,3	13%
Agricultura Pousio	1,5	2,4	2,3	2,8	0,1	6%
Cerrado/Pastagens	0,9	2,4	2,4	3,9	0,3	12%
Mata Ciliar/Cerradão	1,4	2,8	2,8	4,0	0,3	10%
Solo Exposto	0,001	1,5	1,6	3,5	0,4	25%

Quadro 5.2.3.3. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área de Minas Gerais

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	0,9	3,3	3,4	4,1	0,4	12%
Agricultura Irrigada	0,8	2,5	2,5	3,6	0,3	12%
Agricultura Pousio	0,4	2,2	2,2	3,4	0,3	12%
Cerrado/Pastagens	0,001	2,1	2,0	4,2	0,4	17%
Mata Ciliar/Cerradão	0,3	2,5	2,5	3,9	0,4	14%
Solo Exposto	0,001	1,3	1,3	3,0	0,3	25%

Diante da expressiva disponibilidade de energia para o processo evaporativo da água, as classes Água, Mata Ciliar/Cerradão e Agricultura Irrigada apresentaram os maiores valores médios de ET_d (2,5 a 4,1mm). Os intermediários foram obtidos nas classes Cerrado/Pastagens e Agricultura Pousio (2,1 a 2,9mm), enquanto que, os menores em Área Urbana e Solo Exposto (1,3 a 1,8mm) conforme esperado. Nesses alvos, elevadas porcentagens de Rn são destinadas as trocas de calor pelos processos de advecção.

Na Bahia, o valor médio obtido na Agricultura Irrigada se equiparou ao observado em Cerrado/Pastagens, que apresentou coeficiente de variação (CV) menor. Isso demonstra que os erros de classificação contribuíram para a queda do valor médio na Agricultura Irrigada, apesar do seu elevado coeficiente Kappa. Devido à proximidade dos resultados médios entre Cerrado/Pastagens e Agricultura Pousio, pode-se afirmar que consideráveis parcelas destas áreas se encontravam revestidas com vegetação rasteira.

Os diagramas de caixa da ET_d nas áreas da Bahia (A), Goiás/Brasília (B) e Minas Gerais (C), em diferentes classes de uso e cobertura da terra, são apresentados na Figura 5.2.3.1. Encontraram-se as maiores dispersões nas classes Solo Exposto e Área Urbana, comprovada pela elevada porcentagem e similaridade dos CVs. Os dados de Solo Exposto na Bahia apresentaram comportamento próximo à distribuição normal (simétrico), com leve tendência a assimetria positiva (75,6 % dos dados concentrados no intervalo de 1,2 a 1,8 mm). Entretanto, Goiás/Brasília e Minas Gerais obtiveram comportamento assimétrico negativo, visto que 73,2 % e 74,8 % se estabeleceram entre 1,5 a 2,1 mm e 1,1 a 1,7 mm , respectivamente. A classe Área Urbana, tanto na Bahia (75,6% entre 1,4 a 2,1mm), quanto em Goiás Brasília (78,7% entre 1,4 a 2,1mm), apresentou comportamento simétrico.

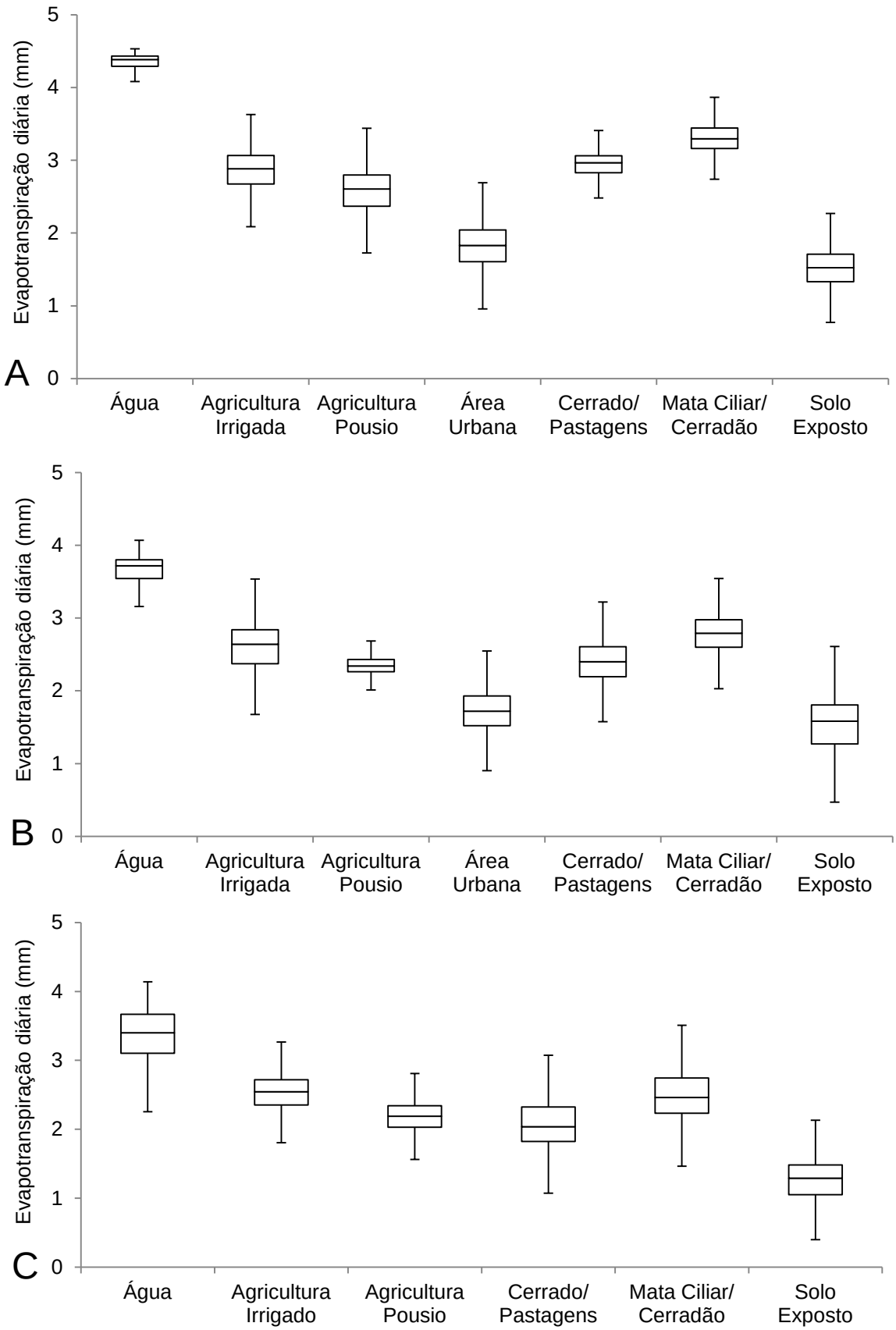


Figura 5.2.3.1. Diagrama de caixa da ET_d em diferentes classes de uso e cobertura da terra nas áreas analisadas. A) Bahia; B) Goiás/Brasília; C) Minas Gerais.

A Agricultura Irrigada também obteve similaridade nos CVs, assim como, comportamento próximo à distribuição normal, já que, 75,0%, 77,3% e 78,1% se concentraram no intervalo compreendido entre 2,7 a 3,2mm (Bahia), 2,3 a 3,0mm (Goiás/Brasília) e 2,3 a 2,9mm (Minas Gerais), respectivamente. Os demais usos não apresentaram similaridade nos seus CVs. Observou-se simetria próxima à distribuição normal na classe Cerrado/Pastagens em Goiás/Brasília (78,0% entre 2,1 a 2,7mm), e Minas Gerais (75,0% entre 1,7 a 2,4mm). Na Bahia, 74,7% dos dados se estabeleceram na faixa de 2,9 a 3,2mm, o que explica o elevado valor médio adquirido nessa classe.

A Agricultura Pousio apresentou assimetria negativa nas três áreas: Bahia (74,8% entre 2,4 a 3,0mm); Goiás/Brasília (75,6% entre 2,3 a 2,5mm); e Minas Gerais (78,5% entre 2,0 a 2,5mm). A classe Mata Ciliar/Cerradão demonstrou leve tendência assimétrica positiva em Minas Gerais (78,5% entre 2,1 a 2,9mm) e simetria próxima à distribuição normal na Bahia (79,5% entre 3,1 a 3,5mm) e Goiás/Brasília (78,2% entre 2,5 a 3,1mm).

Na classe Água, constatou-se situação semelhante à observada na Agricultura Pousio (assimetria negativa nas três áreas). Na Bahia 73,6 % dos dados se enquadraram entre 4,4 a 4,5mm, em Goiás/Brasília 78,3% entre 3,5 a 3,9mm e, em Minas Gerais 78,5% entre 3,1 a 3,9mm. Nesses casos, as dispersões são creditas a classificação errônea dos pixels localizados nas margens dos corpos hídricos.

Na Figura 5.2.3.2 visualiza-se o mapa da ET_d na área da Bahia. Os pixels em tons de laranja correspondem ao intervalo de 0,1 a 2,0mm, no qual se concentraram, principalmente, as classes Solo Exposto, Área Urbana e parte da Agricultura Pousio. Por isso, sua distribuição ocorre de forma homogênea por praticamente todas as parcelas, com relativas concentrações no norte, oeste e sudoeste. Em tons de amarelo e verde (2,1 a 2,9mm), inseriram-se, predominantemente, as classes Agricultura Pousio, bem como parte de Cerrado/Pastagens e Agricultura Irrigada. Como estas classes são as mais representativas em termos de ocupação, sua disseminação ocorre de maneira regular, sem clara concentração em determinada porção. Os tons de azul (3,0 a 4,5mm) correspondem, basicamente, à parte de Cerrado/Pastagens com alta umidade, influenciada pela proximidade às matas ciliares; Agricultura Irrigada, cuja concentração ocorre principalmente na porção

central; Mata Ciliar/Cerradão, que cortam a área longitudinalmente; e Água representada por pequenos açudes e barragens localizadas de forma esparsa.

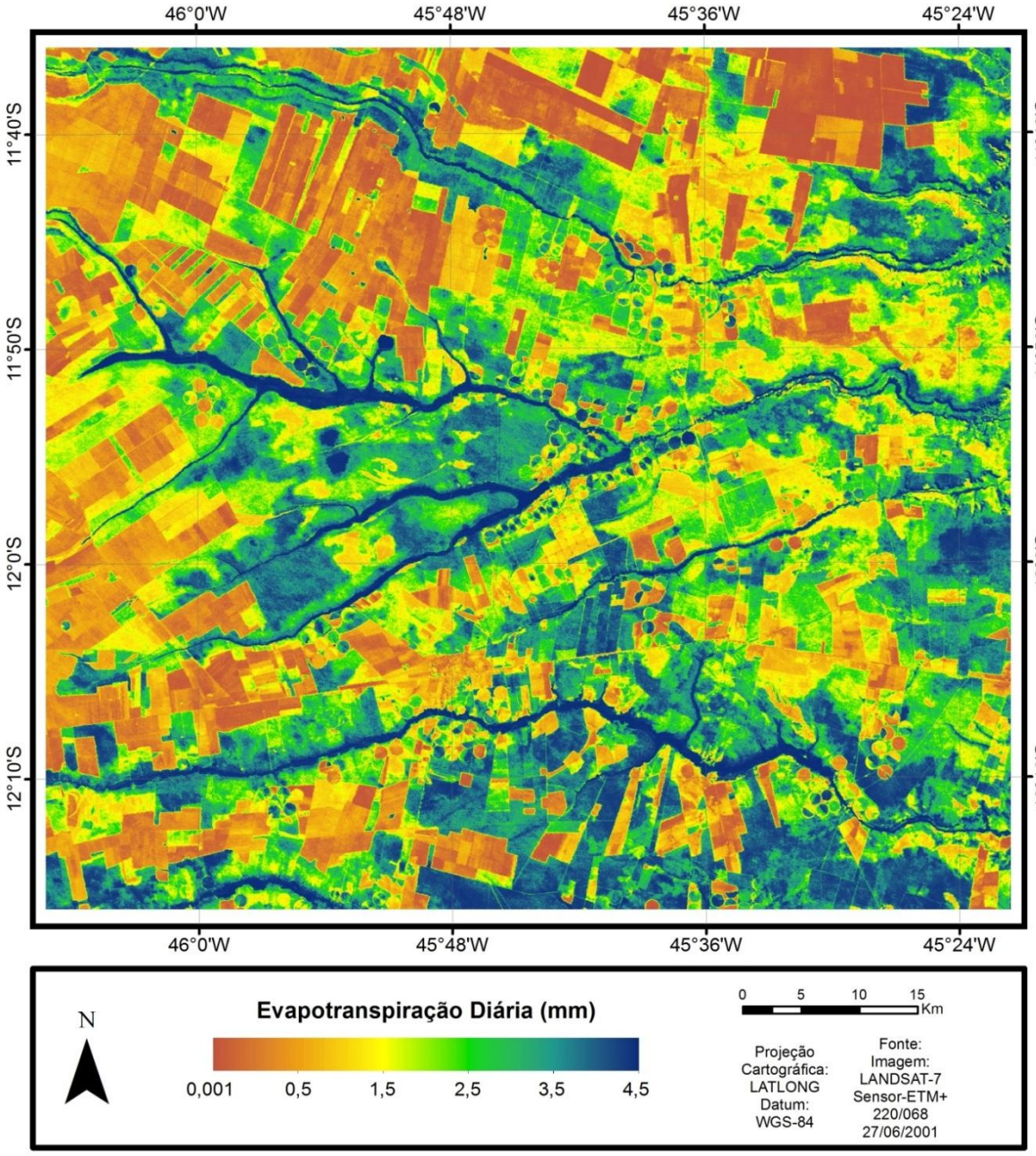


Figura 5.2.3.2. Mapa da ET_d na área da Bahia em 27 de junho de 2001.

Na área de Goiás/Brasília (Figura 5.2.3.3), o intervalo de 0,1 a 2,0 mm representa os pixels em tons de laranja e amarelo, com relativas concentrações nas porções noroeste (cidade de Brasília), nordeste e sudeste. Neste, enquadram-se, principalmente, as classes Solo Exposto, Área Urbana e parte da Agricultura Pousio.

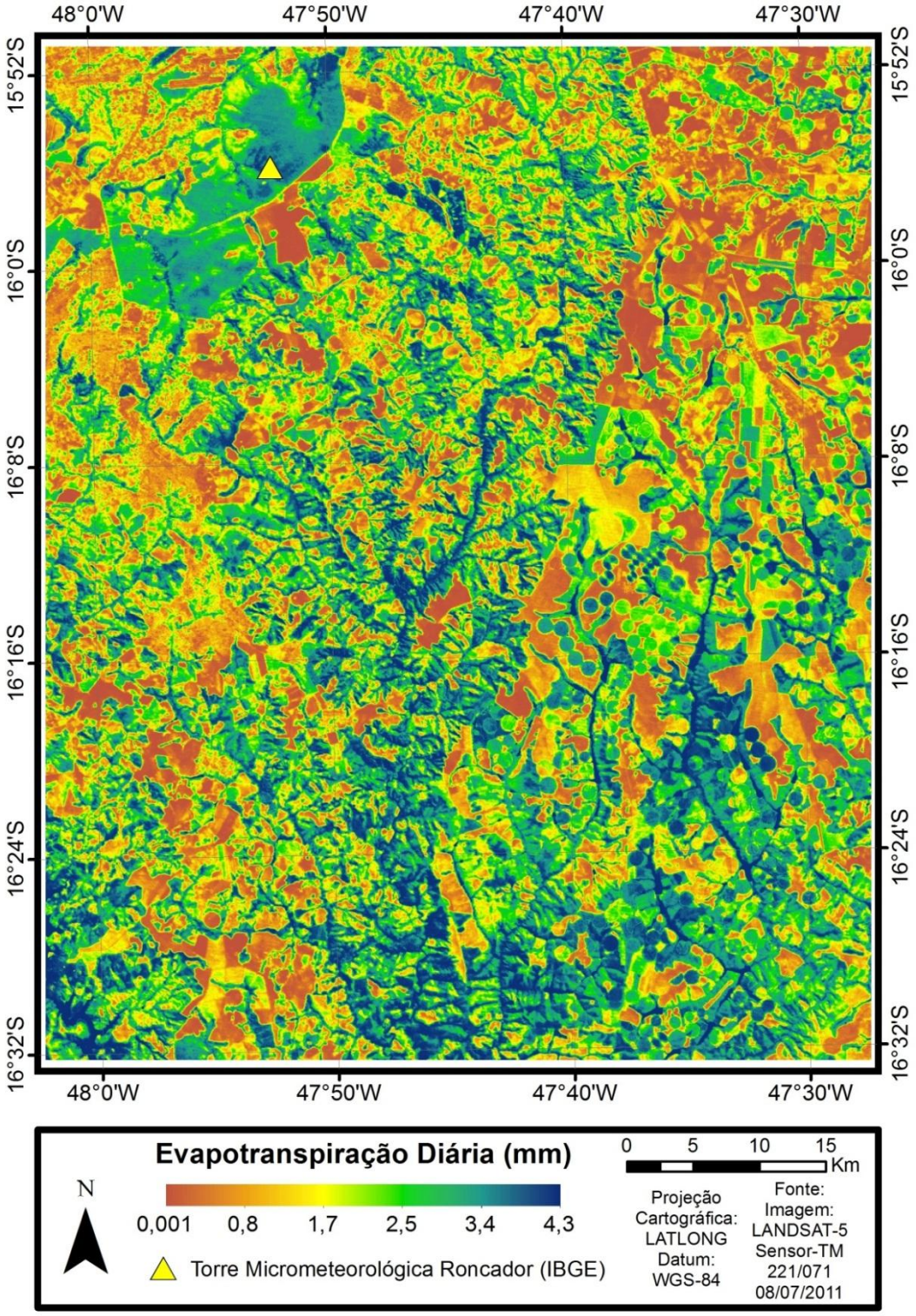


Figura 5.2.3.3. Mapa da ET_d na área de Goiás/Brasília em 08 de julho de 2011.

Os pixels em tons de verde (2,1 a 2,6mm) incorporaram, basicamente, as classes Agricultura Pousio, e Cerrado/Pastagens. Esta classe é a mais representativa em termos de ocupação. Dessa forma, sua espacialização ocorre de maneira regular e homogênea. Nos tons de azul (2,7 a 4,3 mm), incluíram-se parte de

Cerrado/Pastagens e, predominantemente, Agricultura Irrigada (porção sudeste) e Mata Ciliar/Cerradão, que cortam a área verticalmente. Os maiores valores do intervalo correspondem aos pixels classificados como Água, que se concentram na parcela sudoeste.

Na Figura 5.2.3.4 observa-se o mapa da ET_d na área de Minas Gerais. Os pixels em tons de laranja e amarelo correspondem ao intervalo de 0,1 a 1,6mm, no qual se concentraram, principalmente, as classes Solo Exposto e parte da Agricultura Pousio. Sua distribuição ocorre de forma homogênea por praticamente todas as parcelas, com relativa concentração na porção norte. Em tons de verde (1,7 a 2,4 mm), inseriram-se, basicamente, as classes Agricultura Pousio e Cerrado/Pastagens. Como esta classe é a mais representativa em termos de ocupação, sua disseminação ocorre de maneira regular, sem clara concentração. Os tons de azul (2,5 a 4,3 mm) correspondem, predominantemente, às classes Agricultura Irrigada, cuja aglutinação ocorre na porção norte central; Mata Ciliar/Cerradão, que cortam a área longitudinalmente e transversalmente; e Água representada por barragens localizadas de forma esparsa.

Visualiza-se a distribuição espacial da ET_d nas áreas de clima tropical em diferentes classes de uso e cobertura da terra nos Apêndices A, B e C. De forma geral, os intervalos foram condizentes e concentraram os resultados esperados para os diferentes usos e coberturas da terra. Destaque para a classe Cerrado/Pastagens na área da Bahia, cujos valores se aproximaram dos obtidos na Agricultura Irrigada, o que pode ser explicado pela influencia da umidade advinda das matas ciliares. Como as classes Cerrado/Pastagens e Mata Ciliar/Cerradão representam da melhor forma possível os usos naturais das áreas analisadas, seus resultados médios foram comparados aos obtidos na Agricultura Irrigada, a fim de avaliar a quantidade de água transferida à atmosfera por este uso. Em relação à primeira classe citada, averiguaram-se diferenças relativas de: -2,5%, 8,1% e 20,1%, enquanto que para a segunda: -13,5%, -6,5% e 1,3%. Salienta-se a subestimativa às duas classes naturais na área da Bahia e a superestimava à Mata Ciliar/Cerradão na área de Minas Gerais. Nesta, o uso com mata ciliar, onde o solo se encontra constantemente encharcado, é predominante, como observado pela assimetria negativa dos dados. Como a data da imagem de Minas Gerais se encontra mais próxima à estação chuvosa se comparada às demais, pode-se dizer que no transcorrer da estação seca há tendência de maiores injeções de recursos hídricos nas lavouras de soja,

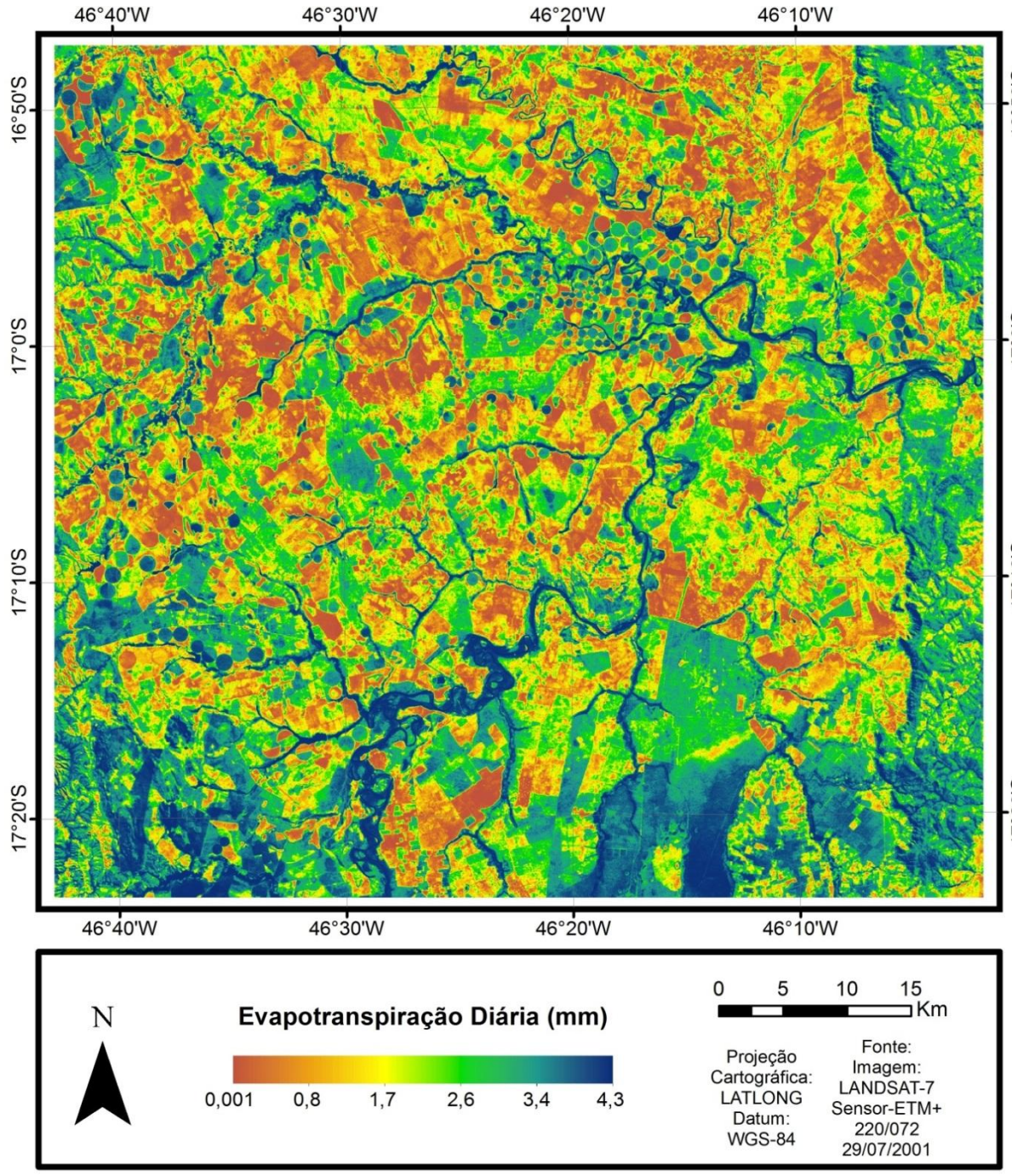


Figura 5.2.3.4. Mapa da ET_d na área de Minas Gerais em 29 de julho de 2001.

tendo em vista o relativo aumento da quantidade de água transferida à atmosfera pelas áreas ocupadas com pivôs centrais. Na Figura 5.2.3.5A, B e C, visualiza-se os elevados valores da FE e, consequentemente, da ET_d nas áreas com matas ciliares a agricultura irrigada por meio de pivôs centrais (tons de verde-forte e azul) se comparado aos usos do entorno, principalmente cerrado (tons verde-forte, amarelo e laranja).

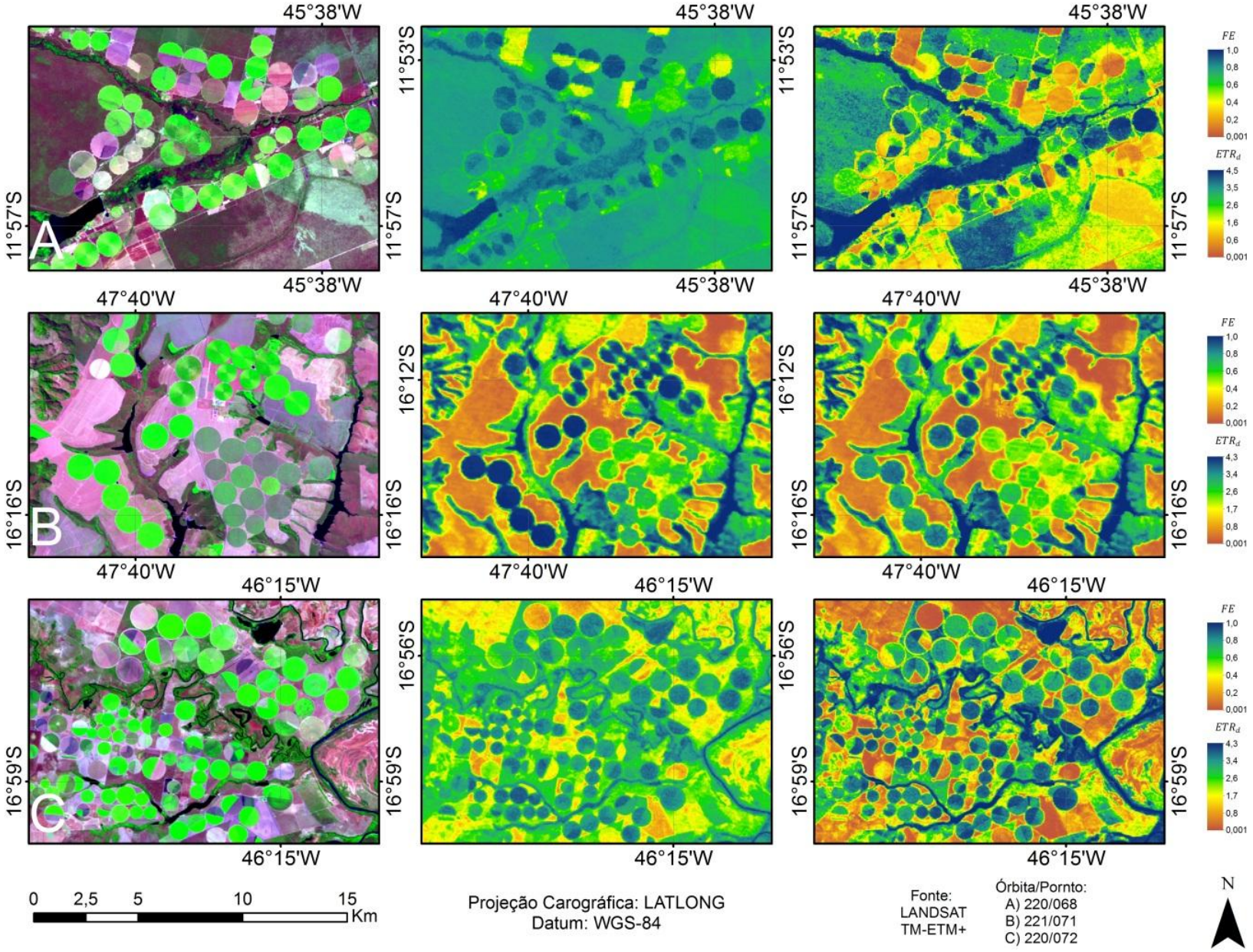


Figura 5.2.3.5. Na coluna da esquerda composição colorida falsa-cor 5(R)G(4)B(3). Na coluna central FE. Na coluna da direita ET_d. A) Bahia; B) Goiás/Brasília; C) Minas Gerais.

5.3. Áreas de clima Subtropical

5.3.1. Uso e cobertura da terra

As áreas de clima subtropical apresentaram classes de uso e cobertura da terra semelhantes. As diferenças ocorreram na Região Central e no Extremo Sul. Na primeira, além da Agricultura Irrigada com arroz, também há Agricultura Sequeiro com soja. Na segunda, foram encontradas áreas de Agricultura Pousio, que correspondem ao arroz precoce colhido, bem como, as classes de Banhado e Dunas. De forma geral, destaca-se o elevado percentual da classe Campo/Pastagens nas três áreas de estudo, demonstrando a forte vocação do Estado na pecuária. Na Região Central, a Agricultura Sequeiro (predominantemente soja) apresentou 9,5% da área total, ou seja, porcentagem próxima da Agricultura Irrigada, demonstrando que a tendência atual da substituição do cultivo de arroz por soja se encontrava bem avançada em 2004. Nas Figuras 5.3.1.1, 5.3.1.2 e 5.3.1.3, visualizam-se os mapas de uso e cobertura da terra, bem como, suas quantificações em hectares e representatividade percentual.

Os coeficientes Kappa, bem como, os desempenhos gerais foram, respectivamente, de: 0,69 e 78,0% (Fronteira Oeste), 0,73 e 79,5% (Região Central) e 0,67 e 74,8% (Extremo Sul). Observam-se as matrizes de erros das referidas áreas nos Quadros 5.3.1.1, 5.3.1.2 e 5.3.1.3. Os maiores coeficientes Kappa foram obtidos na classe de Agricultura Irrigada, sendo 0,88 na Fronteira Oeste e 0,91 na Região Central. A exceção ocorreu no Extremo Sul com 0,71. Este baixo coeficiente está relacionado aos erros de inclusão e omissão para as classes Mata Nativa/Florestamento e, principalmente, Banhado. No Extremo Sul, os maiores valores foram encontrados nas classes Área Urbana (0,94) e Dunas (1,0). Nesta última, não ocorreram erros de inclusão, somente de omissão para a classe Solo Exposto.

Cabe destacar ainda, o desempenho da classe Agricultura Sequeiro (0,88), cujo coeficiente se aproximou ao observado na Agricultura Irrigada. Os erros ocorreram principalmente em relação à classe Mata Ciliar\Florestamento. Entretanto, pode-se afirmar que o classificador utilizado conseguiu discernir, satisfatoriamente, em todas as áreas de estudo, os usos agrícolas das matas nativas e ciliares, mesmo com a relativa semelhança espectral.

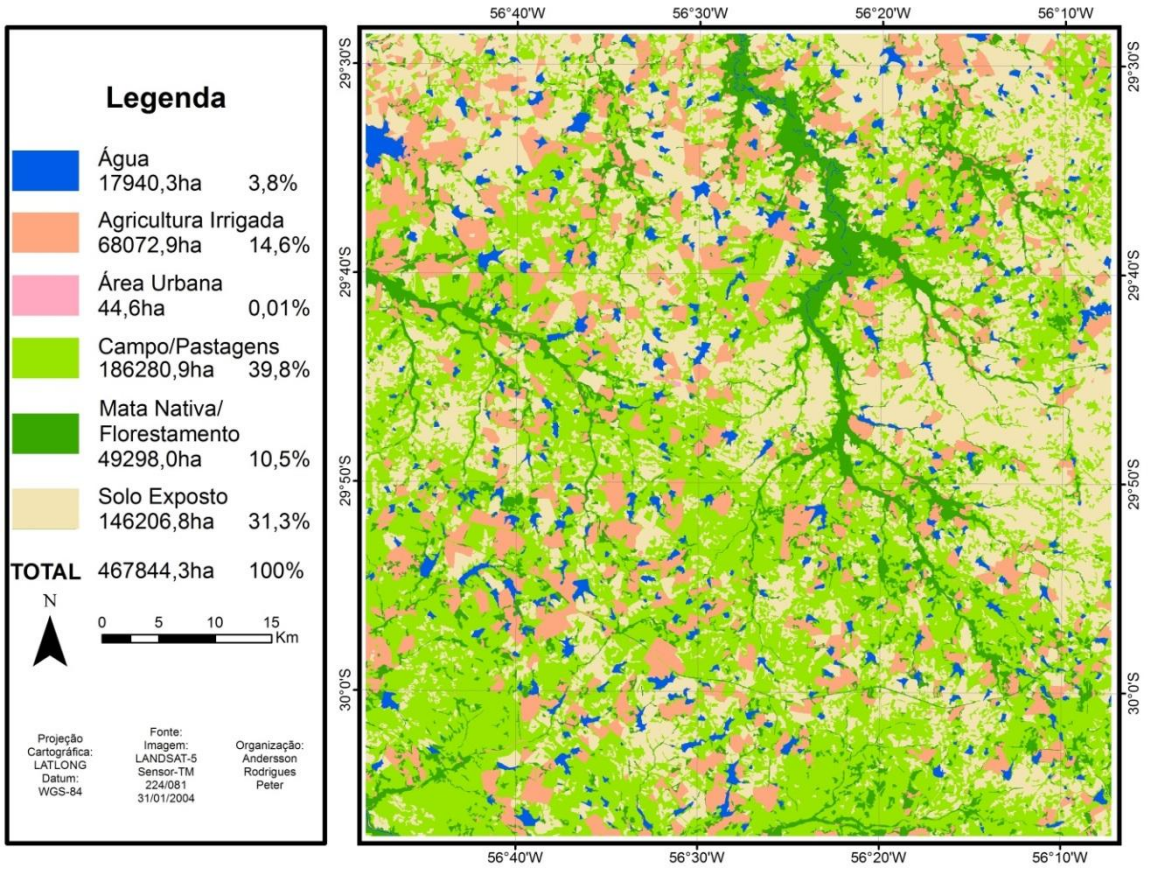


Figura 5.3.1.1. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste em 31 de janeiro de 2004.

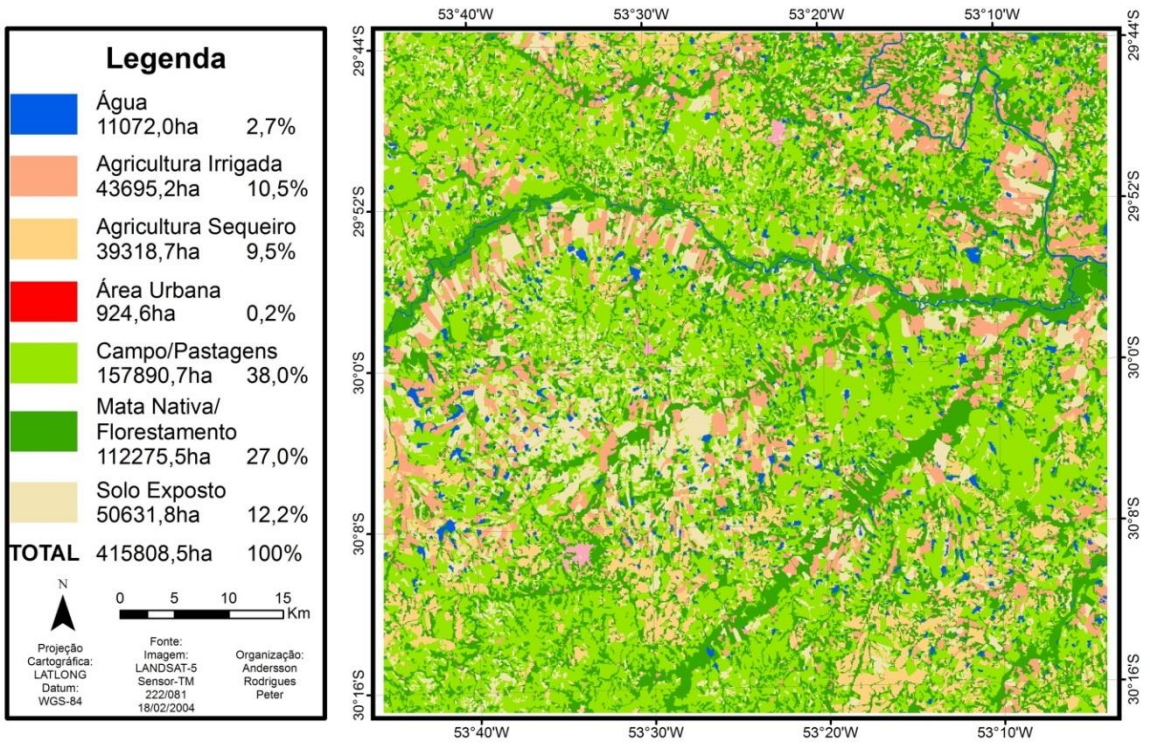


Figura 5.3.1.2. Mapa de uso e cobertura da terra na área da Região Central em 18 de fevereiro de 2004.

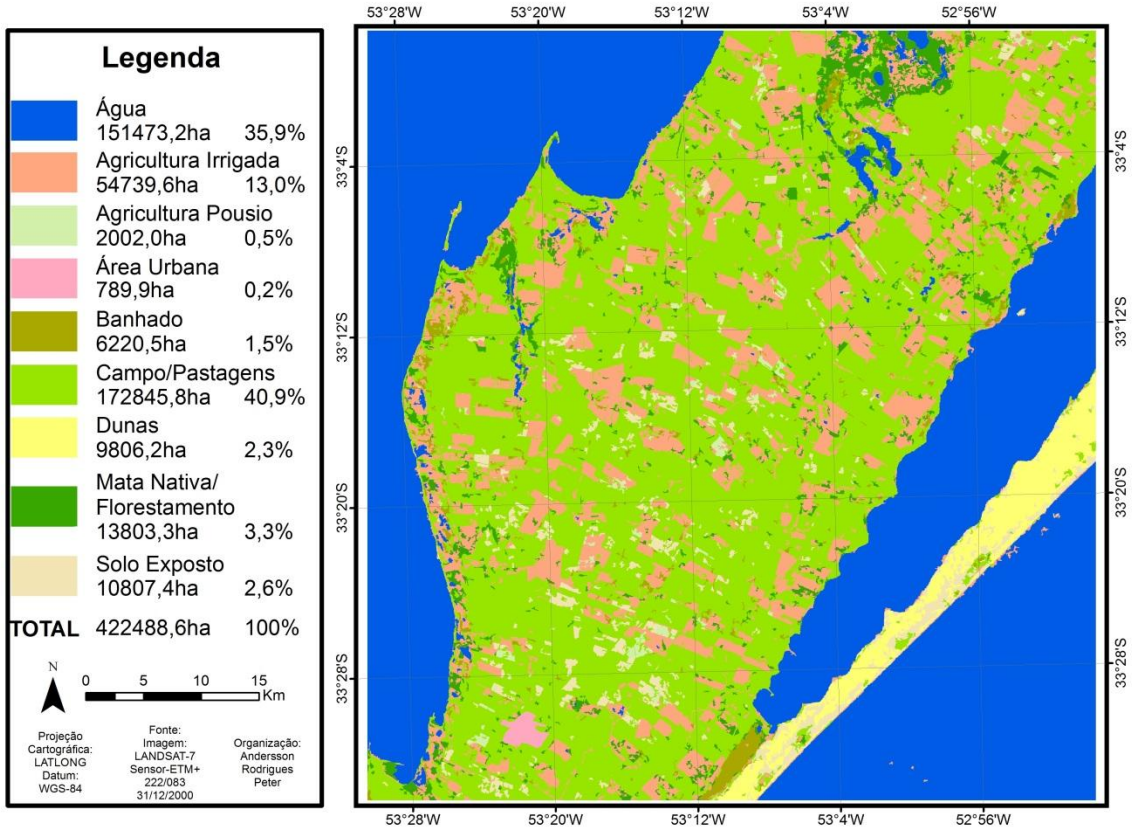


Figura 5.3.1.3. Mapa de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul em 31 de dezembro de 2000.

A classe Área Urbana apresentou coeficiente elevado somente no Extremo Sul (0,94). Na Fronteira Oeste (0,64) e Região Central (0,64), as confusões ocorreram, principalmente, em relação às classes Campo/Pastagens e Solo Exposto. Na Agricultura Pousio (0,58), obteve-se coeficiente abaixo do encontrado na área de estudo (0,67). Isso se deve, principalmente, aos erros de inclusão com a classe Agricultura Irrigada. A ocorrência de chuva nos dias que antecederam a passagem do satélite pode ter contribuído para a conformidade e, consequentemente, confusão espectral entre esses usos.

A classe Água também apresentou bons resultados devido à resposta espectral característica desse uso nos comprimentos de onda capturados pelo sensor, facilitando sua distinção. Diante disso, os valores encontrados foram: 0,82 (Fronteira Oeste), 0,62 (Região Central) e 0,94 (Extremo Sul). O coeficiente abaixo da área na Região Central (0,73) pode ser explicado pela expressiva ocorrência de açudes e represas e a consequente inserção dos pixels localizados nas margens desses corpos d'água. Além disso, atribui-se o elevado coeficiente no Extremo Sul a considerável parcela destinada a Lagoa Mirim e Oceano Atlântico, que não recebem

Quadro 5.3.1.1. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste (RS)

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Área Urbana	Campo/Pastagens	Mata Nativa/Florestamento	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	45	1	0	6	1	1	54	16,7%
Agricultura Irrigada	0	134	0	4	10	0	148	9,5%
Área Urbana	0	0	13	3	0	4	20	35,0%
Campo/Pastagens	0	4	0	328	12	26	370	11,4%
Mata Nativa/Florestamento	0	8	0	33	70	2	113	38,1%
Solo Exposto	0	0	0	103	2	190	295	35,6%
Total	45	147	13	477	95	223	1000	
% Erros de omissão	0,0%	8,8%	0,0%	31,2%	26,3%	14,8%		

Quadro 5.3.1.2. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área da Região Central (RS)

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Agricultura Sequeiro	Área Urbana	Campo\ Pastagens	Mata Nativa\ Florestamento	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	26	1	0	0	6	6	2	41	36,6%
Agricultura Irrigada	0	102	0	0	0	8	0	110	7,3%
Agricultura Sequeiro	0	3	91	0	5	1	1	101	9,9%
Área Urbana	0	0	0	13	6		0	20	35,0%
Campo/Pastagens	0	40	1	0	323	10	15	350	7,7%
Mata Nativa/Florestamento	3	1	29	0	35	144	3	254	43,3%
Solo Exposto	0	0	0	0	27	1	96	124	22,6%
Total	29	147	121	13	402	171	117	1000	
% Erros de omissão	10,3%	30,6%	25,0%	0,0%	19,6%	15,7%	17,9%		

Quadro 5.3.1.3. Matriz de erros ou confusão da classificação do uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul (RS)

Uso e cobertura da terra	Água	Agricultura Irrigada	Agricultura Pousio	Área Urbana	Banhado	Campo\ Pastagens	Dunas	Mata Nativa\ Florestamento	Solo Exposto	Total	% Erros de inclusão
Água	305	2	0	0	3	2	0	2	2	317	3,8%
Agricultura Irrigada	7	95	1	0	11	7	1	3	1	126	24,6%
Agricultura Pousio	0	4	13	0	0	2	0	1	2	22	40,9%
Área Urbana	0	0	0	19	0	1	0	0	0	20	5,0%
Banhado	1	9	1		14	1	0	5	0	31	54,8%
Campo/Pastagens	4	6	5	1	12	224	1	22	85	360	37,8%
Dunas	0	0	0	0	0	0	38	0	0	38	0,0%
Mata Nativa/Florestamento	1	9	0	0	14	3	0	19	0	46	58,7%
Solo Exposto	3	0	2	0	0	6	7	1	21	40	47,5%
Total	321	125	22	20	54	246	47	53	111	1000	
% Erros de omissão	4,9%	24,0%	40,9%	5,0%	74,0%	8,9%	19,1%	64,1%	81,0%		

tanta influência dos materiais em suspensão e dos pixels localizados à margem, como no caso da Região Central.

As demais classes foram analisadas mutuamente, devido às confusões recíprocas entre Mata Nativa/Florestamento, Campo/Pastagens e Solo Exposto. Diante disso, costumam apresentar os menores coeficientes Kappa. Na Mata Nativa/Florestamento, obteve-se 0,58 na Fronteira Oeste, 0,47 na Região Central e 0,38 no Extremo Sul. Usualmente, as maiores confusões nesta classe ocorrem com Campo/Pastagens. Contudo, destaca-se que os erros em relação à Agricultura Irrigada também contribuíram para a queda dos respectivos coeficientes, principalmente na Região Central. Para Campo/Pastagens e Solo Exposto na Fronteira Oeste, Região Central e Extremo Sul foram encontrados, respectivamente, 0,78 e 0,54; 0,87 e 0,74; 0,49 e 0,46. Os menores resultados no Extremo Sul são creditados à confusão espectral proporcionada pela ocorrência elevada de chuva nos dias que antecederam à passagem do satélite.

5.3.2. Balanço de energia

Nos Quadros 5.3.2.1, 5.3.2.2 e 5.3.2.3, visualizam-se os valores médios das variáveis do BE para as distintas classes de uso e cobertura da terra.

Quadro 5.3.2.1. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	621	159	68	393	0,85
Área Urbana	495	75	268	152	0,36
Agricultura Irrigada	553	44	101	409	0,80
Campo/Pastagens	510	69	233	208	0,47
Mata Nativa/ Florestamento	539	57	173	309	0,64
Solo Exposto	501	77	270	152	0,36

A classe Água obteve os maiores valores médios de Rn, com variações entre 587 a 751 $W\ m^{-2}$. Uda (2012), em estudo no Estado de Santa Catarina (SC), adquiriu, nesta classe, valor médio (610 $W\ m^{-2}$) condizente com os encontrados nas três áreas de estudo.

Resultados elevados também foram observados nas classes Agricultura Irrigada (548 a 692 $W\ m^{-2}$) e Mata Nativa/Florestamento (536 a 665 $W\ m^{-2}$).

Quadro 5.3.2.2. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área da Região Central

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	587	117	61	410	0,87
Área Urbana	483	68	163	252	0,60
Agricultura Irrigada	548	33	41	474	0,92
Agricultura Sequeiro	496	27	84	385	0,82
Campo/Pastagens	503	56	146	299	0,67
Mata Nativa/ Florestamento	536	41	82	414	0,83
Solo Exposto	478	68	172	238	0,57

Quadro 5.3.2.3. Valores médios das variáveis do BE ($W\ m^{-2}$) para cada classe de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul

Uso da terra	$\boldsymbol{Rn}$	$\boldsymbol{G}$	$\boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{LE}$	$\boldsymbol{FE}$
Água	751	222	43	480	0,92
Área Urbana	599	88	285	225	0,44
Agricultura Irrigada	692	72	168	451	0,73
Agricultura Pousio	661	89	245	328	0,56
Banhado	669	75	204	390	0,66
Campo/Pastagens	614	81	287	242	0,45
Dunas	471	140	258	73	0,22
Mata Nativa/ Florestamento	665	59	191	415	0,68
Solo Exposto	578	106	290	182	0,38

Santos (2009), em estudo na Região Central do RS, encontrou valores entre 670 a 700 $W\ m^{-2}$ para cobertura vegetativa com densidade intermediária e agricultura irrigada em início de cultivo. Assim como averiguado na pesquisa do autor citado, a classe Agricultura Irrigada obteve resultado médio superior ao adquirido na Mata Nativa/Florestamento e no Banhado. Isso evidencia a grande quantidade de água despendida pela rizicultura.

Ademais, Agricultura Sequeiro apresentou valor médio inferior ao observado na classe Campo/Pastagens. Uda (2012) evidenciou situação semelhante, na qual obteve 444 $W\ m^{-2}$ para agricultura e 451 $W\ m^{-2}$ para pastagem. Além dos erros de classificação, atribui-se tal resultado a possível distribuição esparsa da chuva, acarretando em diferentes níveis de umidade presente nesses usos.

Os elevados índices de precipitação pluvial, comuns o ano todo na região, dificultaram a distinção entre as classes Campo/Pastagens e Solo Exposto, influenciando, diretamente, em seus respectivos valores médios. Dessa forma, estabeleceram-se entre 503 a 614 $W\ m^{-2}$ (Campo/Pastagens) e 478 a 578 $W\ m^{-2}$ (Solo Exposto). Santos (2009) encontrou resultados inferiores a 670 $W\ m^{-2}$ para

vegetação nativa pouco densa. Além de Solo Exposto, observaram-se os menores valores médios nas classes Dunas e Área Urbana, com variações entre 471 a 599 $W\ m^{-2}$.

No G, a classe Água obteve os maiores valores absolutos e porcentagens médias em relação ao Rn (G/Rn), com variações entre 117 a 222 $W\ m^{-2}$ e 20 a 30%. Sendo assim, aproximaram-se ao sugerido por Silva e Bezerra (2006), ou seja, 30 % de Rn. Isso se deve à baixa influência, nos valores médios, dos pixels localizados nas margens dos corpos hídricos. A classe Dunas também apresentou 30% de Rn. Credita-se tal resultado a umidade advinda das águas marítimas. Valores médios elevados também foram observados nas classes Solo Exposto e Área urbana, com variações entre 68 a 106 $W\ m^{-2}$ e 13 a 16% (G/Rn). Giacomoni (2005), em estudo realizado no Estado do RS, obteve porcentagem semelhante para o uso com área urbana (15,9 %). Para solo exposto, Santos (2009) adquiriu resultados superiores a 100 $W\ m^{-2}$. O autor ainda destaca que, as incertezas nos dados de G estariam relacionadas à necessidade de calibração dos parâmetros locais, a fim de dirimir os erros da estimativa. Os resultados intermediários foram observados nas classes Agricultura Pousio e Campo/Pastagens, com variações entre 56 a 89 $W\ m^{-2}$ e 11 a 13 %. As classes Agricultura Irrigada, Mata Nativa/Florestamento, Agricultura Sequeiro e Banhado obtiveram os menores valores, com variações entre 27 a 75 $W\ m^{-2}$ e 5 a 11%. Giongo (2011) e Santos (2009) adquiriram, respectivamente, resultados similares em usos com agricultura irrigada (15 a 70 $W\ m^{-2}$ e 5 a 10%).

No H, encontraram-se os maiores valores absolutos e porcentagens médias em relação ao Rn (H/Rn) nas classes Solo Exposto e Área Urbana, com variações entre 163 a 290 $W\ m^{-2}$ e 48 a 55%. Giacomoni (2005) e Santos (2009) obtiveram resultados semelhantes para os usos área urbana e baixa cobertura vegetal, ou seja, 181,6 $W\ m^{-2}$ e 59,8%, e 200 a 400 $W\ m^{-2}$, respectivamente.

As classes Campo/Pastagens, Dunas, Agricultura Pousio e Banhado enquadraram os resultados médios intermediários, com variações entre 147 a 286 $W\ m^{-2}$ e 29 a 55 % (H/Rn). Santos (2009) adquiriu, para vegetação nativa, valores por volta de 200 $W\ m^{-2}$, concordando com os encontrados nas três áreas de estudo. Cabe salientar, a elevada porcentagem de Rn destinada a esta variável na classe Banhado (29%), mesmo estando coerente com o adquirido por Giacomoni

(2005) (29,6 %). Isso se deve aos erros de classificação e confusão com Campo/Pastagens.

A classe Mata Nativa/Florestamento apresentou comportamento bastante diferenciado, pois ora os valores tenderam aos encontrados em Campo/Pastagens e ora se aproximaram aos adquiridos em Agricultura Irrigada, com variações entre 82 a 191 $W\ m^{-2}$ e 15 a 32%. Isso pode ser creditado aos erros de classificação, bem como, pela quantidade e distribuição das precipitações pluviais nos dias que antecederam às datas de aquisição das imagens. Giacomoni (2005) encontrou resultado similar aos obtidos nas três áreas para o uso florestas (111,4 $W\ m^{-2}$).

Observaram-se os menores valores médios nas classes Água, Agricultura Irrigada e Agricultura Sequeiro, com variações entre 41 a 168 $W\ m^{-2}$ e 6 a 11% (H/Rn). Giacomoni (2005) obteve resultado similar para o uso água, sendo a média absoluta de 44,8 $W\ m^{-2}$ e relativa de 5,3%. Para os usos com agricultura, Santos (2009) e Uda (2012) encontraram valores médios de 95 $W\ m^{-2}$ e 87 $W\ m^{-2}$, respectivamente.

No LE, as classes Água, Agricultura Irrigada, Mata Nativa/Florestamento, Banhado e Agricultura Sequeiro abrangeram os maiores valores médios absolutos e relativos (LE/Rn), com variações entre 309 a 480 $W\ m^{-2}$ e 58 a 86%. O elevado resultado obtido na Agricultura Sequeiro (78%) é atribuído ao vigor vegetativa da soja no período em que foi registrada a imagem. Salienta-se ainda, o baixo resultado na classe Banhado (58%), entretanto, condizente com o adquirido por Giacomoni (2005) (55,2%).

Os valores intermediários médios foram encontrados nas classes Campo/Pastagens e Agricultura Pousio, com variações entre 208 a 328 $W\ m^{-2}$ e 39 a 50% (LE/Rn). Dessa forma, assemelharam-se aos adquiridos por Uda (2012) (305 $W\ m^{-2}$) e Giacomoni (2005) (50,05%) para áreas campestres. As classes Dunas, Área Urbana e Solo exposto enquadraram os menores resultados, com variações entre 79 a 252 $W\ m^{-2}$ e 15 a 50%. Esta última porcentagem, encontrada na Região Central para Solo Exposto, evidencia a distribuição irregular da chuva sobre a área de estudo, assim como, maior parcela dos pixels que deveriam ser classificadas como Campo/Pastagens inseridos nesse uso. Uda (2012) obteve valores aproximados para solo exposto (240 $W\ m^{-2}$).

Diante da relação com LE, observaram-se os maiores valores da FE nas classes Água, Agricultura Irrigada, Mata Nativa/Florestamento, Agricultura Sequeiro, com variações entre 0,73 a 0,90. Cabe destacar que, na Região Central, a FE média da Agricultura Irrigada superou os demais usos da área, inclusive da classe Água. Esses elevados valores provêm do cultivo de arroz por meio de sistemas de irrigação de superfície por inundação, nos quais a lâmina d'água se mantém cobrindo a cultura por um longo período.

5.3.3. Análise da evapotranspiração

Nos Quadros 5.3.3.1, 5.3.3.2 e 5.3.3.3 são apresentados os dados estatísticos de ET_d (mm) para cada classe de uso e cobertura da terra.

Quadro 5.3.3.1. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Fronteira Oeste

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	0,5	6,9	7,2	8,3	1,04	15%
Área Urbana	1,5	2,4	2,4	4,2	0,46	19%
Agricultura Irrigada	1,5	5,6	5,7	8,3	0,59	10%
Campo/Pastagens	0,001	3,2	3,2	7,5	0,74	23%
Mata Nativa/ Florestamento	0,9	4,5	4,5	7,3	0,85	19%
Solo Exposto	0,001	2,4	2,4	6,7	0,77	32%

Quadro 5.3.3.2. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área da Região Central

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	1,1	6,5	6,7	7,8	0,8	13%
Área Urbana	1,8	3,8	3,9	6,2	0,5	13%
Agricultura Irrigada	2,9	6,2	6,3	7,5	0,5	9%
Agricultura Sequeiro	0,001	5,1	5,1	7,4	0,5	9%
Campo/Pastagens	1,0	4,4	4,4	7,2	0,6	15%
Mata Nativa/ Florestamento	0,4	5,6	5,7	7,8	0,7	12%
Solo Exposto	0,001	3,6	3,7	6,8	0,9	24%

A classe Água obteve os maiores valores médios (6,5 a 8,0mm), seguido da Agricultura Irrigada (5,6 a 6,2mm). Esta superou as classes Banhado, Agricultura Sequeiro e Mata Nativa/Florestamento (4,5 a 5,6mm) nas três áreas. Assim como as matas ciliares, os banhados se encontram constantemente encharcados, salvo

Quadro 5.3.3.3. Dados estatísticos da ET_d (mm) para diferentes classes de uso e cobertura da terra na área do Extremo Sul

Uso da terra	Mínimo	Média	Mediana	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Água	1,1	8,0	8,0	9,0	0,3	3%
Área Urbana	1,4	3,3	3,3	5,9	0,5	17%
Agricultura Irrigada	0,001	6,1	6,2	8,8	0,6	10%
Agricultura Pousio	0,5	4,6	5,2	7,1	1,3	27%
Banhado	1,3	5,4	5,4	8,2	0,6	12%
Campo/Pastagens	0,001	3,5	3,3	8,5	0,8	23%
Dunas	0,001	1,3	1,1	7,6	1,2	91%
Mata Nativa/ Florestamento	1,3	5,5	5,6	8,8	0,7	13%
Solo Exposto	0,001	2,8	2,8	8,9	1,1	41%

períodos de estiagem, descartado pelo registro de quantidades expressivas de chuva nos dias que antecederam a data de aquisição da imagem. Diante disso, deve-se frisar que os elevados volumes transferidos à atmosfera pela ET na Agricultura Irrigada não estão relacionados aos erros de classificação, mas sim ao método de irrigação por inundação utilizado no cultivo de arroz.

Os valores médios intermediários foram adquiridos nas classes Campo/Pastagens e Agricultura Pousio, com variações entre 3,2 a 4,6mm. Dessa forma, aproximaram-se ao encontrado em Banhado, o que demonstra o desenvolvimento avançado da vegetação pioneira nessas áreas.

Por fim, observaram-se os menores resultados nas classes Dunas, Solo Exposto e Área Urbana (1,3 a 3,8mm), conforme esperado. Na Figura 5.3.3.1 são apresentados os diagramas de caixa da ET_d para cada classe de uso e cobertura da terra nas áreas da Fronteira Oeste (A), Região Central (B) e Extremo Sul (C), respectivamente.

Os maiores CVs ocorreram nas classes Dunas e Solo Exposto. A primeira apresentou elevada dispersão em razão da concentração de 22,0% dos dados no valor 0,1mm, enquanto que 57,0% se distribuíram, com certo padrão de ocorrência, pelo intervalo de 0,2 a 2,3mm. Credita-se essa concentração no menor resultado à influencia da umidade advinda das águas costeiras, elevando os valores de G e diminuindo a porcentagem da energia destinada a LE nesses pixels. À medida que as Dunas se afastam da costa, não há contribuição suficiente de umidade a ponto de negativar o $IVDN$, condicional necessária para o cálculo de 30% de Rn nos corpos hídricos. Portanto, essas variações estão relacionadas a fatores

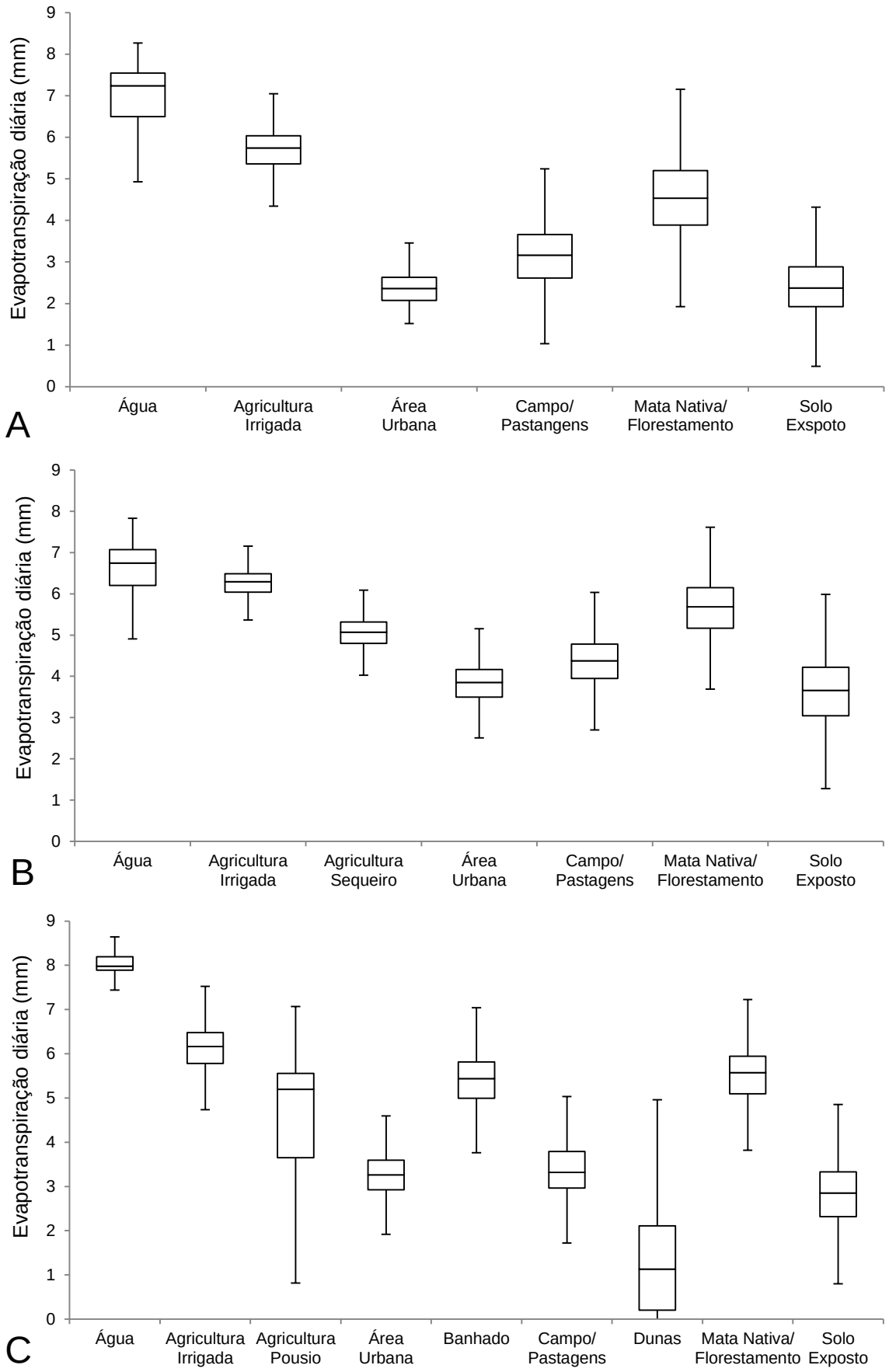


Figura 5.3.3.1. Diagrama de caixa da ET_d em diferentes classes de uso e cobertura da terra nas áreas analisadas. A) Fronteira Oeste; B) Região Central; C) Extremo Sul.

de localização e influências ambientais, já que os erros de classificação nesse uso tendem a ser baixos, constatado pelo seu coeficiente Kappa. Os CVs na Área Urbana, diferentemente dos obtidos nas áreas de clima tropical, foram baixos e se aproximaram dos encontrados nos demais usos. Esse resultado pode ser explicado pelas baixas representatividades da classe em termos de ocupação se comparado às áreas citadas.

A classe Água obteve os menores CVs, principalmente na área do Extremo Sul. Isso se deve a singular resposta espectral deste uso, o que facilita o processo de separação executado pelo classificador. Ademais, há pouca influencia dos pixels localizados às margens dos corpos hídricos, diante da elevada porcentagem de ocupação na área referida.

A similaridade dos CVs na classe Agricultura Irrigada demonstra a boa correlação dos pixels inseridos nas áreas destinadas ao cultivo do arroz. Os resultados evidenciaram assimetria negativa nas três áreas: Fronteira Oeste (78,0% entre 5,3 a 6,3mm); Região Central (77,9% entre 6,0 a 6,7mm) e Extremo Sul (71,2% entre 5,8 a 6,8mm). A Agricultura Sequeiro também obteve CV similar aos encontrados na Agricultura Irrigada, o que garante a boa classificação desse uso, apesar dos erros ocorridos, principalmente com relação às florestas de encosta (Mata Nativa/Florestamento). Ressalta-se ainda a baixa dispersão dos dados centrais, já que 75,0% se estabelecerem no intervalo de 4,7 a 5,5mm, comprovando simetria próxima à distribuição normal.

No Banhado houve relativa variação dos valores centrais, pois 70,2 % se localizaram no intervalo entre 5,0 a 6,1 mm , demonstrando simetria negativa. Resultado similar foi constatado na classe Mata Nativa/Florestamento, já que 73,3%; 73,9%; e 73,0% se inseriram nos intervalos de 3,8 a 5,6mm; 5,1 a 6,5mm; e 5,0 a 6,3 mm nas áreas da Fronteira Oeste, Região Central e Extremo Sul, respectivamente. Na classe Campo/Pastagens, as três áreas apresentaram comportamento próximo à distribuição normal com leve tendência à assimetria positiva, sendo: Fronteira Oeste (71,5% entre 2,6 a 3,8mm); Região Central (73,7% entre 3,8 a 5,1mm); e Extremo Sul (70,9% entre 2,7 a 3,9mm).

Observa-se na Figura 5.3.3.2 o mapa da ET_d na Fronteira Oeste. O intervalo de 0,1 a 2,9 mm representa os pixels em tons de laranja e amarelo, com relativa concentração na porção central. Neste, inseriram-se, principalmente, as classes

Solo Exposto e Área Urbana. Os pixels, em tons de verde-claro (3,0 a 4,4mm), enquadraram, basicamente, Campo/Pastagens e parte de Mata Nativa/Florestamento. A primeira classe é a mais representativa em termos de ocupação. Dessa forma, sua espacialização ocorre de maneira regular, sem clara aglutinação em determinada parcela. Os tons em verde-forte (4,5 a 6,4mm) são representados, em sua maioria, pela Mata Nativa/Florestamento. Percebe-se relativa predominância das matas ciliares na parcela norte. Os maiores valores (6,5 a 8,3mm), em tons de azul, correspondem aos pixels classificados como Agricultura Irrigada e Água, os quais não apresentaram concentrações específicas.

O mapa da ET_d na Região Central pode ser visualizado na Figura 5.3.3.3. Os pixels em tons de laranja e amarelo, com relativa concentração no centro-sudoeste, correspondem ao intervalo de 0,1 a 3,9 mm , no qual se concentraram, principalmente, as classes Solo Exposto, Área Urbana e parte de Campo/Pastagens. Os pixels em tons de verde-claro (4,0 a 4,9mm) enquadraram, predominantemente, a classe Campo/Pastagens. Como esta é a mais representativa em termos de ocupação, sua disseminação ocorre de maneira regular e homogênea. Os tons em verde-forte (5,0 a 5,9mm) correspondem, basicamente, à Agricultura Sequeiro e parte da Mata Nativa/Florestamento. Nesta, as florestas de encosta são mais representativas se comparada às localizadas no entorno dos corpos hídricos e planícies de inundação. Sendo assim, distribuem-se, principalmente, nas porções norte, sudoeste e sudeste. Os pixels em tons de azul (6,0 a 7,9mm) cortam a área longitudinalmente e transversamente (matas ciliares e Agricultura Irrigada) e representam pequenos açudes e barragens localizadas de maneira esparsa (Água).

Visualiza-se na Figura 5.3.3.4 o mapa da ET_d no Extremo Sul. Os pixels em tons de laranja e amarelo correspondem ao intervalo de 0,1 a 3,9 mm, no qual, inseriram-se, principalmente, as classes Dunas, Solo Exposto, Área Urbana, Agricultura Pousio e Campo/Pastagens. Observa-se a concentração dos pixels deste intervalo em praticamente todas as parcelas centrais. Em tons de verde-claro (4,0 a 5,9 mm), enquadraram-se, basicamente, as classes Banhado, Mata Nativa/Florestamento, e parte da Agricultura Irrigada. Devido à baixa representatividade de ocupação desses usos, não apresentaram concentrações específicas e, consequentemente, distribuíram-se por pequenos fragmentos

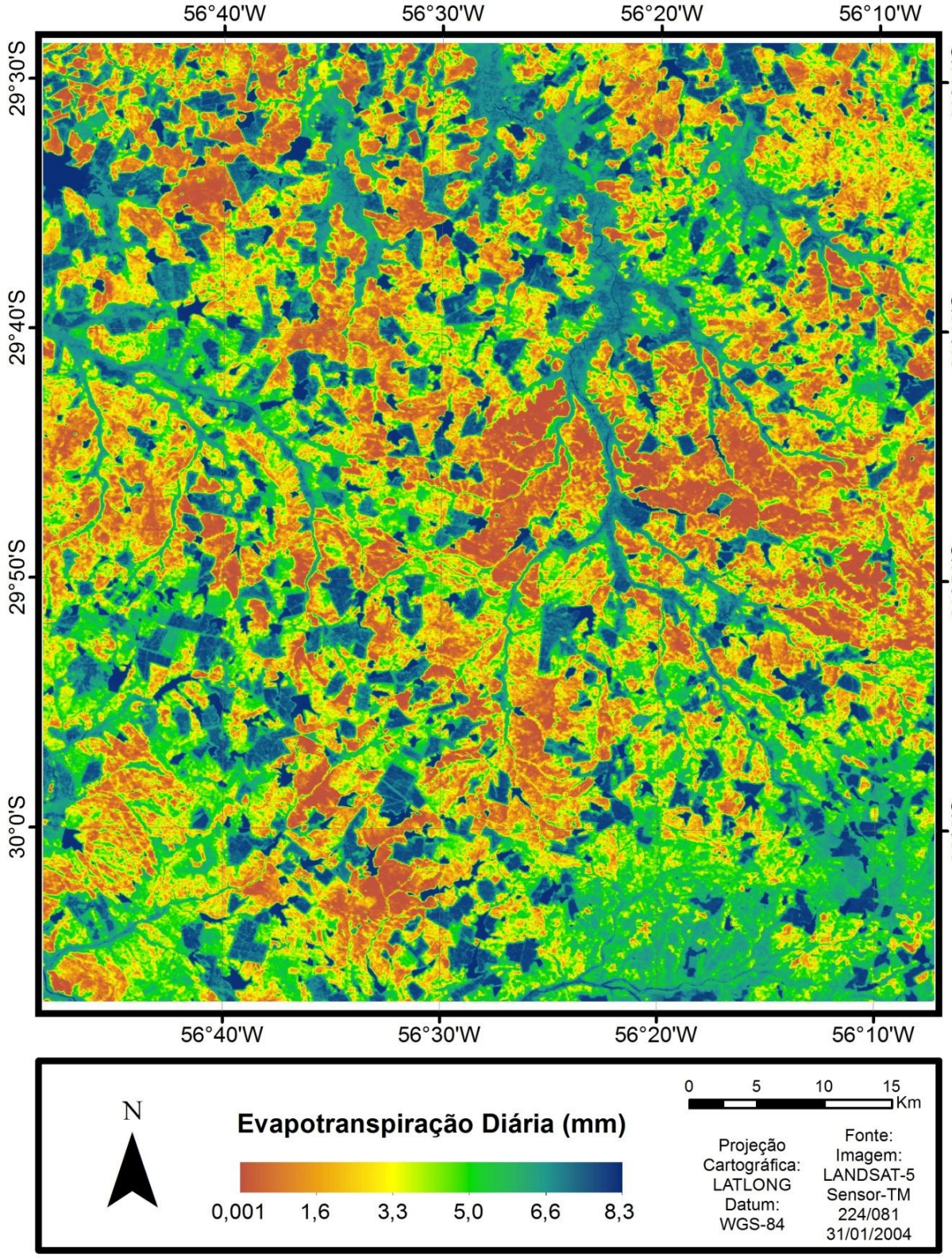


Figura 5.3.3.2. Mapa da ET_d na área da Fronteira Oeste em 31 de janeiro de 2004.

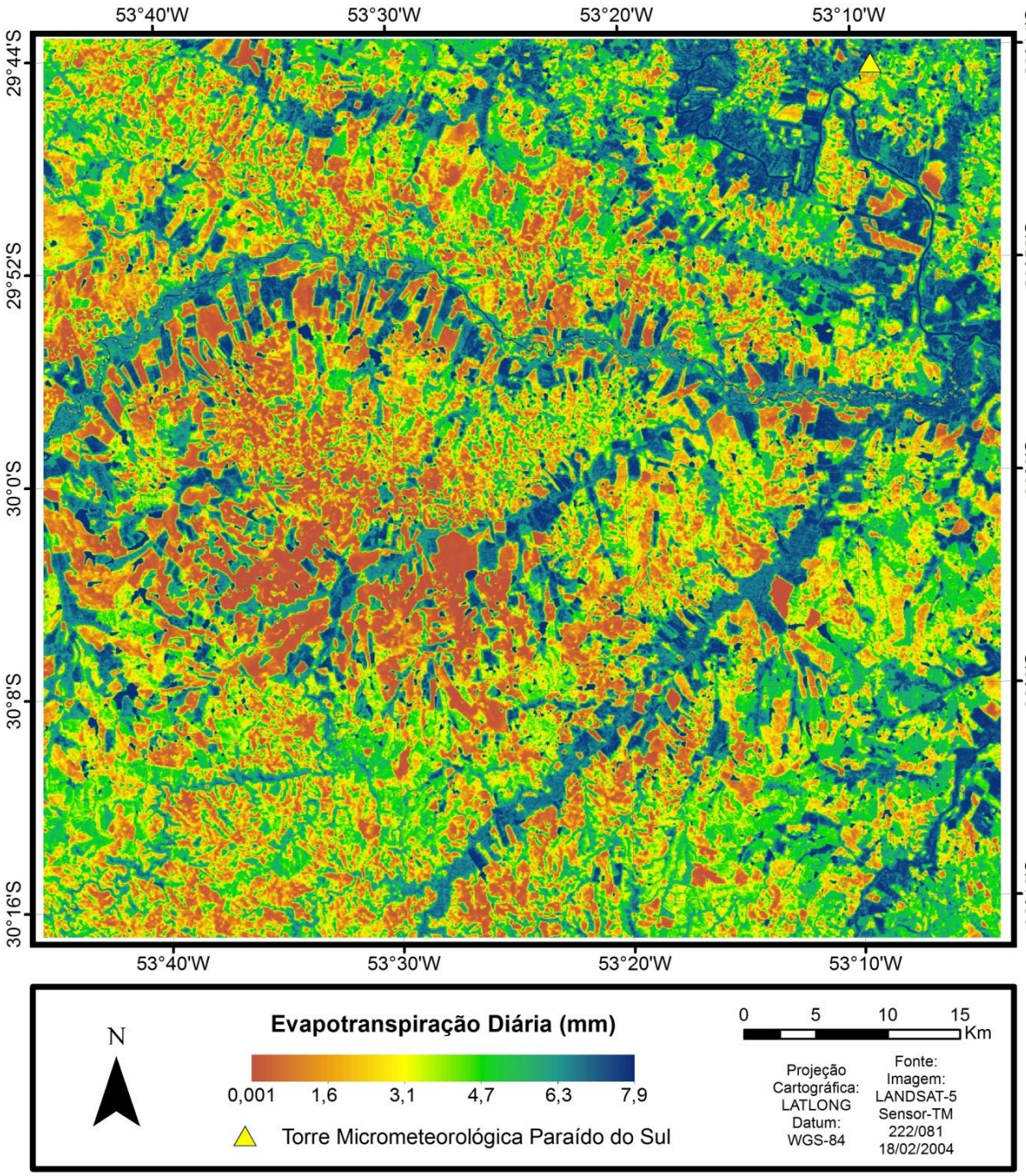


Figura 5.3.3.3. Mapa da ET_d na área da Região Central em 18 de fevereiro de 2004.

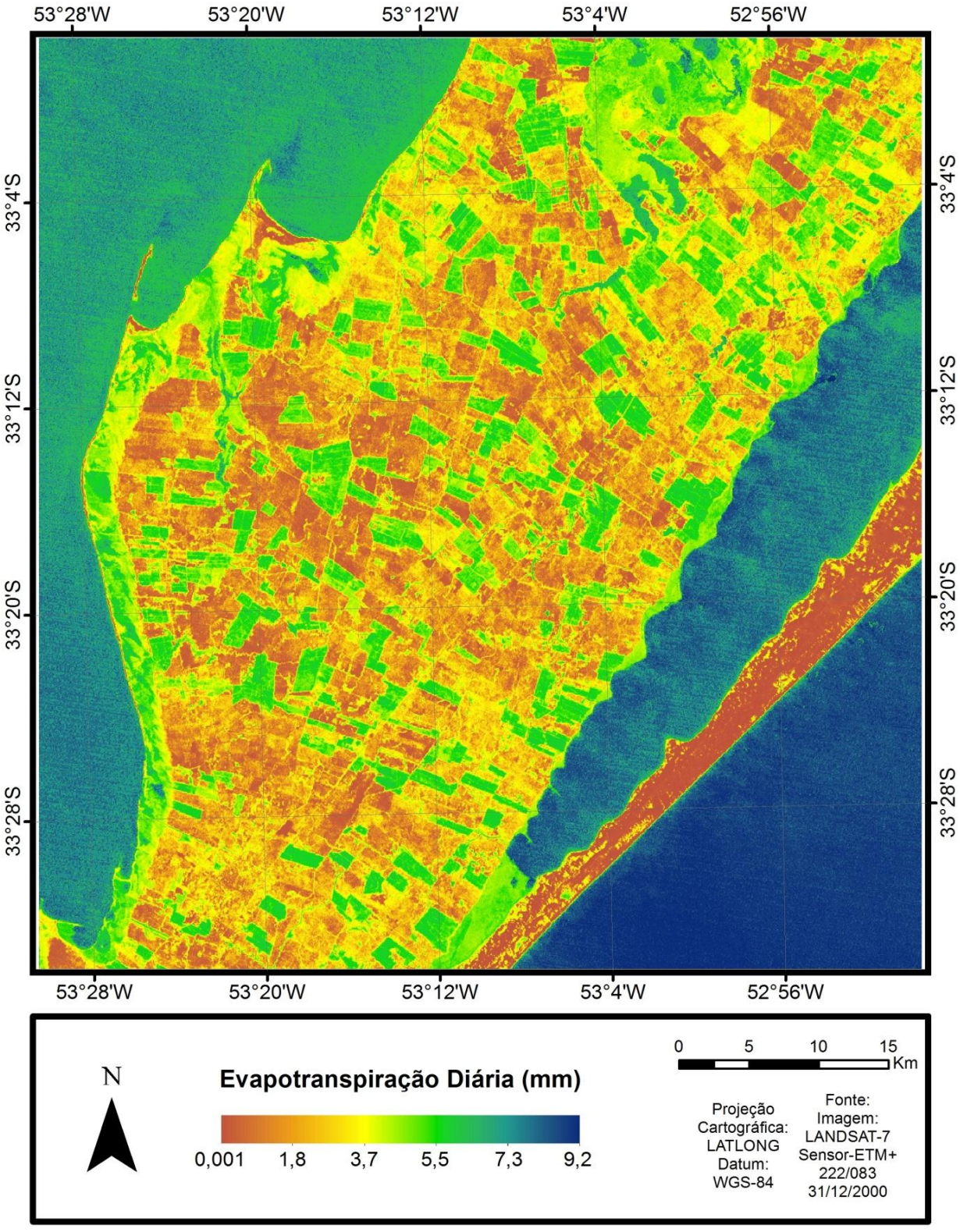


Figura 5.3.3.4. Mapa da ET_d na área do Extremo Sul em 31 de dezembro de 2000.

esparsos. Os tons de verde-forte (6,0 a 6,9mm) correspondem, predominantemente, à Agricultura Irrigada, cuja aglutinação ocorre nas parcelas centrais, evidenciada pela demarcação geométrica dos cultivos de arroz, bem como, parte da classe Água, representada pelos corpos hídricos da Lagoa Mirim e Lagoa Mangueira. Os maiores resultados, em tons de azul (7,0 a 9,2mm) correspondem aos pixels da classe Água situados na parcela sudeste (Oceano Atlântico).

Apesar da boa correlação entre os intervalos de ET_d e as classes de uso e cobertura da terra correspondentes, constatou-se relativa sobreposição dos valores intermediários, principalmente no Extremo Sul. Isso se deve, em parte, aos erros de classificação e a ocorrência satisfatória de chuvas na região, o que dificulta a identificação de intervalos característicos para Campo/Pastagens e Solo Exposto com vegetação em desenvolvimento. Contudo, os resultados demonstraram coerência com as características espectrais dos alvos imageados. Visualiza-se a distribuição espacial da ET_d nas áreas de clima subtropical em diferentes classes de uso e cobertura da terra nos Apêndices D, E e F.D

Assim como nas áreas de clima tropical, os valores médios de ET_d da casse Agricultura Irrigada foram comparados aos obtidos em Campo/Pastagens e Mata Nativa/Florestamento, obtendo-se diferenças relativas de 77,9% e 25,6% (Fronteira Oeste), 42,9 % e 10,5 % (Região Central), 75,8 % e 11,1 % (Extremo Sul), respectivamente. Salienta-se que, em todas as áreas, os resultados foram superiores aos encontrados nos usos naturais. Na Figura 5.3.3.5A, B e C, visualiza-se a quantidade expressiva de água transferida à atmosfera (FE e ET_d) pela agricultura irrigada com rizicultura (tons de azul e verde-forte) se comparado aos demais usos da área, principalmente, campos (tons em amarelo) e matas nativas (tons em verde-forte), na qual se incluem as matas ciliares.

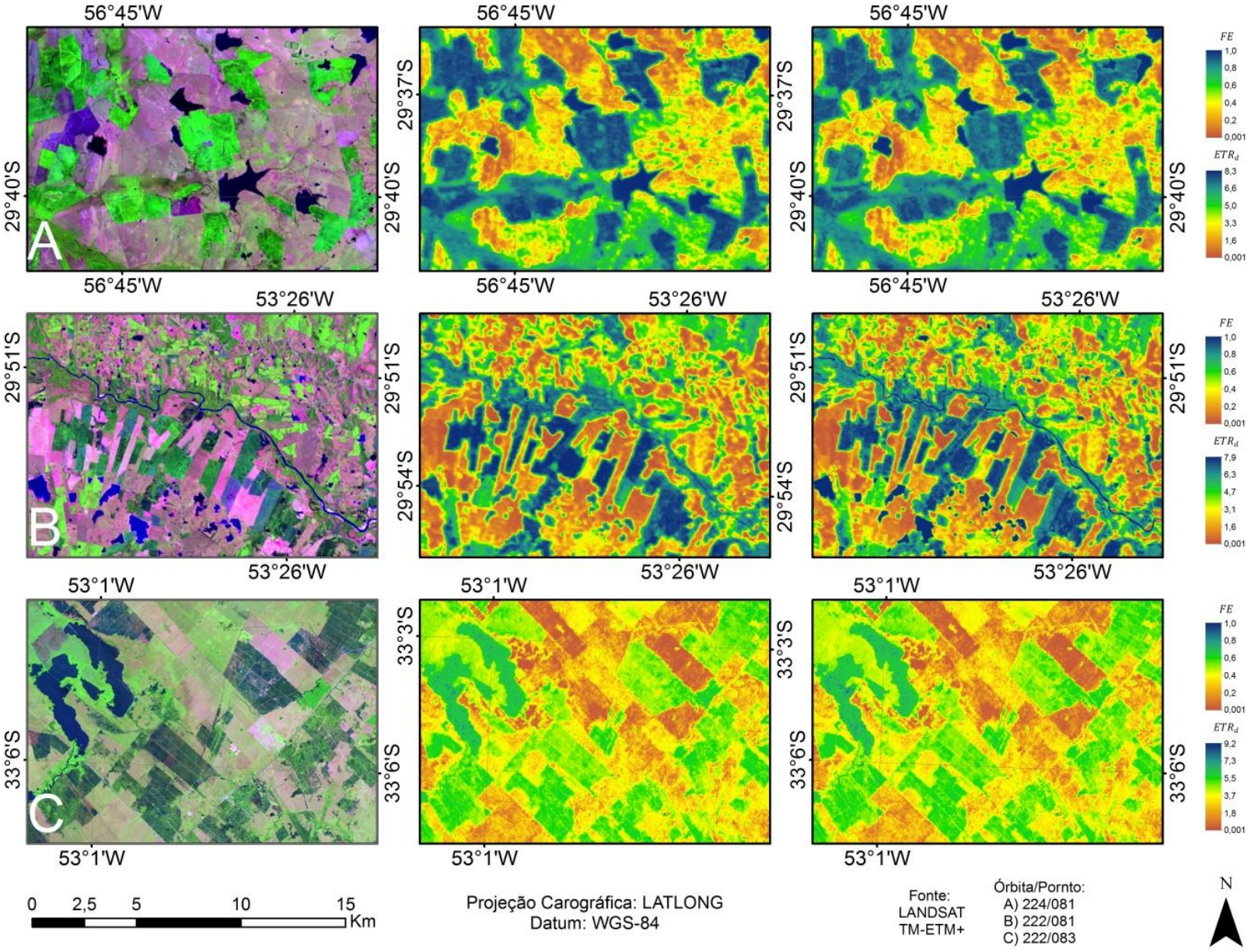


Figura 5.3.3.5. Na coluna da esquerda composição colorida falsa-cor 5(R)G(4)B(3). Na coluna central FE. Na coluna da direita ET_d. A) Fronteira Oeste; B) Região Central; C) Extremo Sul.

6. Conclusões e considerações finais

A metodologia empregada possibilitou a análise da ET em diferentes classes de uso e cobertura da terra, demonstrando a viabilidade de estimá-la por meio de imagens de satélite. O classificador apresentou resultados satisfatórios, já que em nenhuma das áreas o desempenho geral ficou abaixo de $70\,\%$. Ademais, os coeficientes Kappa obtidos para todos os usos nas respectivas áreas são considerados aceitáveis na literatura. Isso deve ser ressaltado, pois a metodologia utilizada para a classificação do uso e cobertura da terra é relativamente simples, já que se trata de um processo automático, realizado de maneira rápida e com baixo custo.

Destaca-se também, a sensibilidade do algoritmo em discernir a umidade presente nos diferentes usos. Esses resultados garantem a confiabilidade para estimar a ET_d nos climas analisados, ratificado pelos baixos erros encontrados ao comparar os dados modelados com os observados em superfície pelo método das correlações turbulentas. Apenas no G, observaram-se diferenças consideráveis nas duas áreas de estudo, o que está dentro do esperado como destacado na literatura consultada. Na área de Goiás/Brasília, os erros absolutos e relativos da ET_d, quando comparados aos observados, foram de 0,24mm e 9,1%, enquanto que na Região Central do Estado do RS, obteve-se 0,03mm e 0,5%, respectivamente.

Além disso, os valores médios da ET_d nas distintas classes de uso e cobertura da terra se estabeleceram conforme o esperado em ambos os tipos climáticos. Nas áreas de clima tropical, os menores resultados foram observados nas classes Solo Exposto e Área Urbana com variações entre 1,3 a 1,7mm; os intermediários nas classes Agricultura Pousio, Cerrado/Pastagens e Agricultura Irrigada entre 2,1 a 2,9mm; e o maiores nas classes Mata Ciliar/Cerradão e Água, variando entre 2,5 a 4,1mm . Nas áreas de clima subtropical, os menores valores foram obtidos nas classes Dunas, Solo Exposto e Área Urbana, com variações entre 1,3 a 3,8mm; os intermediários nas classes Campo/Pastagens, Agricultura Pousio, Agricultura Sequeiro e Banhado, entre 3,2 a 5,4 mm ; e os maiores nas classes Mata Nativa/Florestamento, Agricultura Irrigada e Água, com variações entre 4,5 a 8,0mm.

Comparando-se o resultado adquirido pela Agricultura Irrigada aos usos que representam da melhor forma possível as condições naturais, observou-se que os

valores médios absolutos (2,5 a 2,9mm) se aproximaram aos encontrados em Cerrado/Pastagens (2,1 a 2,9mm), com diferenças relativas de -2,5% a 20,1%. Entretanto, nas áreas de clima subtropical, o contraste foi mais expressivo. Enquanto na Agricultura Irrigada observaram-se resultados médios absolutos entre 5,7 a 6,3mm, em Campo/Pastagens variaram entre 3,2 a 4,4mm. Dessa forma, as diferenças relativas ficaram na ordem de 42,9% a 77,9%.

Mesmo com a proximidade dos valores de ET_d da Agricultura Irrigada com soja aos encontrados nos usos naturais nas áreas de clima tropical, cabe salientar o elevado consumo de água nessa classe. Nas áreas de Goiás/Brasília e Minas Gerais os dados tenderam a assimetria negativa, ou seja, maior concentração acima da média. Inclusive na área de Minas Gerais observou-se superestimava em relação à classe Mata Ciliar/Cerradão, na qual há o predomínio das matas ciliares com solos constantemente encharcados. Apesar disso, pode-se dizer que o método de irrigação, bem como, o período adotado para a prática, levando em consideração somente imagens analisadas, apresentou menores consumos de água no processo de ET se comparada às áreas selecionadas no clima subtropical. Nestas, além do método de inundação, no qual a lâmina d'água cobre o solo por um longo período, o que contribui para elevação da ET e dos impactos provocados à disponibilidade hídrica regional, observou-se que o período em que o ciclo cultural é realizado tem forte influência sobre o resultado, já que no verão há maior disponibilidade de energia.

Em suma, a metodologia empregada pode ser utilizada por planejadores e gestores de recursos hídricos, subsidiar as etapas do planejamento agrícola, bem como, fornecer dados para os comitês de bacias, visando à implantação de medidas para o aperfeiçoamento o uso da água, principalmente na atividade de irrigação, a fim de encontrar um ponto de equilíbrio, e assim, evitar o seu desperdício.

Referências

AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com esse fenômeno? **Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável**: Porto Alegre, v. 1, n. 4, p. 11–14, 2005.

ALLEN, R. G.; ALLEN, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rigths regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systmes**, v. 19, p. 251–268, 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo:** guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006.

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

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSSEN, W. Surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Advanced training and users manual**. Idaho, 2002.

ANA. Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: informe 2012 edição especial. Brasília, DF: ANA, 2012.

ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T.; WITMER, R. E. **Sistema de classificaçao do uso da terra e do revestimento do solo para utilização com dados de sensores remotos**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

ASTER GDEM. **Search**. Disponível em: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>. Acesso em: abril de 2013.

BARRETO, R. **Identificação de áreas susceptíveis a eventos extremos de chuva no Distrito Federal**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M. Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87–100, 2000.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; *et al.* SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 85, p. 85–93, 2005.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 213–229, 1998.

BATALHA, M. A. **Análise da vegetação da ARIE Cerrado Pé de Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP)**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1997.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. revisada e ampliada. Viçosa: UFV, Imprensa Universítária, 1995.

BERNARDO, S. **Impacto ambiental da irrigação no Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br>. Acesso em: fevereiro de 2013.

BEZERRA, B. G. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduaçao em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

BEZERRA, M. V. C. **Determinação do coeficiente de cultivo e da biomassa do algodoeiro irrigado por meio de imagens TM–LANDSAT 5**. 2009. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 1444, 2008.

BORGES, V. P. **Aplicação do algoritmo SEBAL e imagens LANDSAT para estimativa da demanda hídrica do algodoeiro irrigado no oeste da Bahia**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2008.

BRUTSAERT, W. **Hydrology: an introduction**. UK: Cambridge University Press, 2009.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. Spring: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395–403, 1996.

CARNEIRO, G. C.; DINIZ, N.; MENEZES, P. H. Aplicação de um Sistema de informação geográfico como instrumento de gerenciamento de dados dos recursos hídricos superficiais de Irrigação pelo sistema de pivô central do município de Cristalina-GO. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, p. 261-268, 2011.

CARNEIRO, J. V. **Fluxos turbulentos de CO2 em uma área de arroz irrigado no RS**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

CERAGRO. Centro de Referência de Agronegócio da Região Sul. **Calendário Agrícola**. Disponível em: <http://ceragro.iica.int/>. Acesso em: agosto de 2013.

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**, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

CHAVEZ, J. L.; GOWDA, P. H.; HOWELL, T. A.; MAREK, T. H.; NEW, L. L. Evapotranspiration mapping using METRIC TM for region with highly advective condicions. In: ASABE Annual International Meeting. **Anais...** Minneapolis: ASABE, 2007.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; *et al.* Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119–133, 2011.

DPI. **Divisão de Processamento de Imagens**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br>. Acesso em: janeiro de 2014.

CPACT. EMBRAPA CLIMA TEMPERADO (LABORATÓRIO DE AGROMETEOROLOGIA). **Dados Climáticos**. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/>. Acesso em: abril de 2013.

DE BRUIN, H. A. R. From Penman to Makkink. In: Hooghart, J.C. (Ed.). Proceedings and information. **TNO Commitee on Hydrological**, vol. 39. The Netherlands: Gravennhag, 1987.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 2007. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

GASPAR, M. T. P. **Sistema aqüífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão**. 2006. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

GIACOMONI, M. H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2011.

GLCF. Global Land Cover Facility. **Landsat Geocover Mosaics**. Disponível em: <http://www.glcf.umd.edu/data/mosaic/>. Acesso em: janeiro de 2013.

GOMES, A. S.; SCIVITTARO, V. B.; PETRINI, J. A.; FERREIRA, L. H. G. A água: distribuição, regulamentação e uso na agricultura, com ênfase ao arroz irrigado. **Circular Técnica**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008.

GOMES, H. B. **Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009. Tese (Doutorado) – Programa de Pós- Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento**. João Pessoa: Universitária, 1994.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Últimas notícias**. Disponível em: <http://www.rs.gov.br/noticias>. Acesso em: abril de 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de climas dos Brasil**. 2002. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br>. Acesso em: janeiro de 2013.

IBGE. **Mapa de biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/biomas.pdf>. Acesso em: abril de 2013.

IBGE. **Manual técnico de uso da terra**. n. 7, 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: fevereiro de 2013a.

IBGE. **Downloads**. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br>. Acesso em: abril de 2013b.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações e Dados**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: abril de 2013.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Introdução ao Spring**: apostila teórica. São Paulo: INPE, 2004.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984.

LBA. Biosfera-Atmosfera na Amazônia. **Arquivo Torres**. Disponível em: <http://lba2.inpa.gov.br>. Acesso em: janeiro de 2014.

LEITÃO, M. M. V. B. R. **Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada. Campina Grande, PB**. 1989. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 1989.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. In: FREITAS, M. A. V. F. (Org.). **O Estado das Águas no Brasil–1999**: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. 1. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, p.73–92, 1999.

MACEDO, V. R. M. **Influência dos sistemas de produção e manejo no uso da água pela planta de arroz**. 2004. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org>. Acesso em: dezembro de 2012.

MACHADO, G. Demanda e disponibilidade hídrica no sistema Lagoa Mirim - São Gonçalo–Rio Grande do Sul. **Discente Expressões Geográficas**, Florianópolis, v. 3, p. 61–82, 2007.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. M.; FRANCOS, D. F.; STEINMETZ, S.; *et al.* BRS Atalanta: alternativa para o uso racional da água nas lavouras de arroz irrigado do RS. **Circular Técnica**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007.

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

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Org.): **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1999.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem LANDSAT 5 - TM na bacia do Acaraú-CE**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MENEZES, S. J. M. C. **Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

MOORS, E. Evaporation. In: BERKENS M. F. P.; DOLMAN A. J.; TROCH P. A. (Orgs.). **Climate and the hydrological cicle**. Wallingford, UK: IAHS Publication, 2008.

MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P. V. Avaliação da fração evaporativa para conversão de medidas instantâneas em valores diários de evapotranspiração. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Modeling evapotranspiration**. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov>. Acesso em: agosto de 2013.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do Rio São Francisco**. 2008. Tese (Doutorado) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NOVÁK, V. **Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system progress in soil science**. Bratislava, Slovakia: Springer, 2012.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SADIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2. ed. São José dos Campos: A. Silva Vieira, 2009.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RURALBR. **Portal dia de campo**: mais arroz com menos água. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/>. Acesso em: fevereiro de 2013.

SAA. Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio. **Estatística e informações**. Disponível em: <www.saa.rs.gov.br>. Acesso em: dezembro de 2012.

SANTOS, A. R. DOS; PELUZIO, T. M. DE O.; SAITO, N. S. **Spring 5.1.2 passo a passo**: aplicações práticas. Alegre, ES: CAUFES, 2010.

SANTOS, C. C. M. **Impactos da modernização da agricultura no Oeste Baiano: repercussão no espaço do cerrado a partir da década de 80**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2000.

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SCHIMD, H. P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 87, 1997.

SILVA, B. B. **Determinação da evapotranspiração com imagens Landsat 5 – TM e SEBAL**. 2009 Mini Curso.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação da evapotranspiração em escala regional através do SEBAL e imagens LANDSAT 5–TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 243–252, 2005.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens LANDSAT 5 **–** TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 174–186, 2006.

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

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; *et al.* Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Revista Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1218–1226, 2012.

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

SULFLUX. **Rede Sul brasileira de fluxos superficiais e mudança climáticas**. Disponível em: <http://www.sulflux.ufsm.br/>. Acesso em: agosto de 2013.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil part A: calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462–476, 2009a.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil part B: application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 477–490, 2009b.

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

TIMM, A. U. **Estimativa dos fluxos de energia superficiais utilizando o modelo de superfície NOAH modificado para culturas alagadas**. 2011. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e suas Aplicações, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

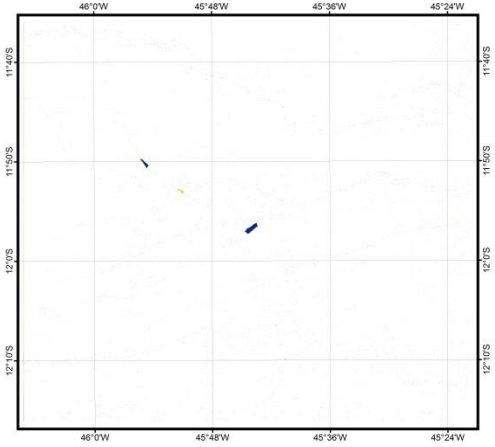
TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, 2000.

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

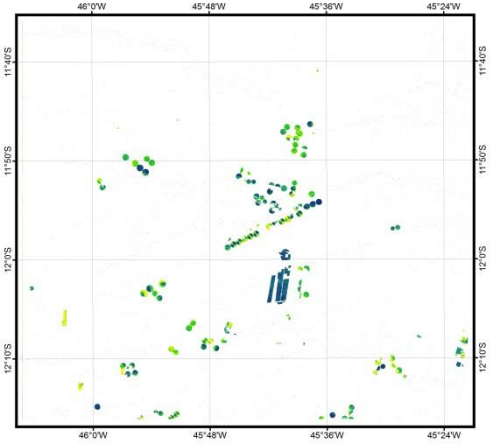
Apêndices

APÊNDICE A – Distribuição espacial da ET_d na área da Bahia em diferentes classes de uso e cobertura da terra

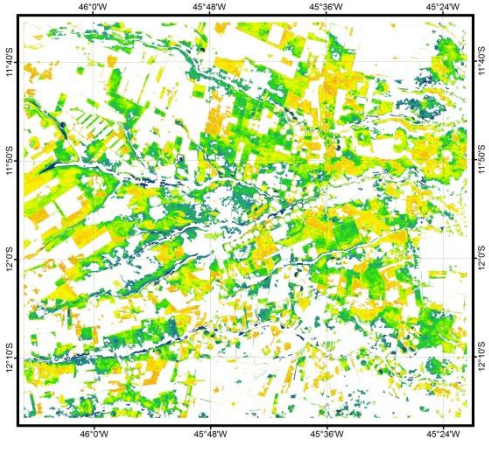
Água



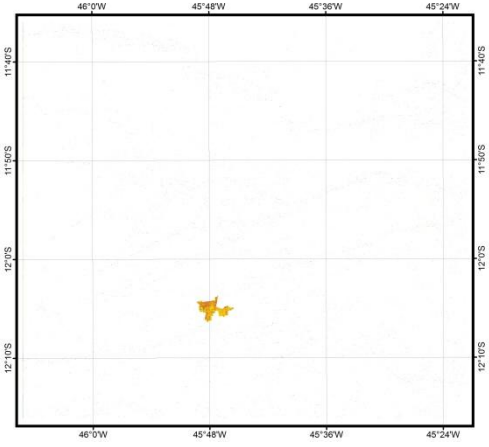
Agricultura Irrigada



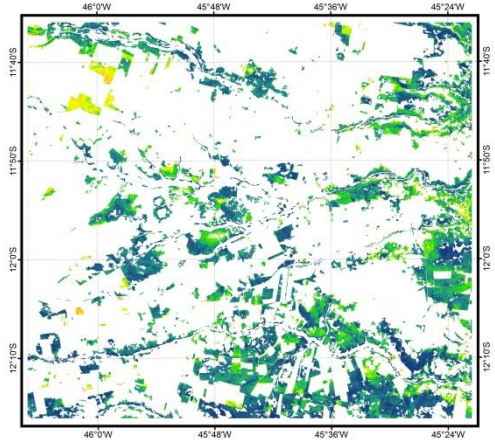
Agricultura Pousio



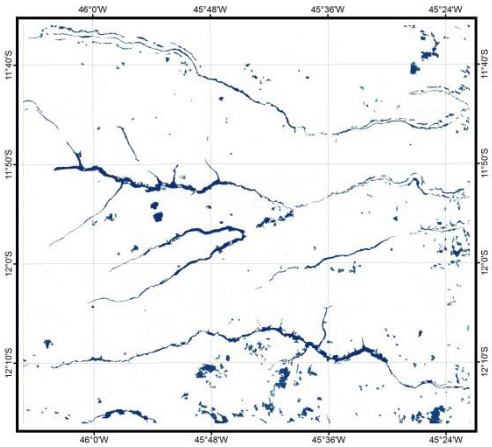
Área Urbana



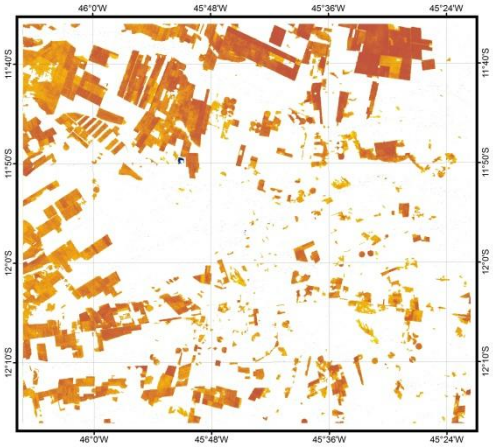
Cerrado/Pastagens

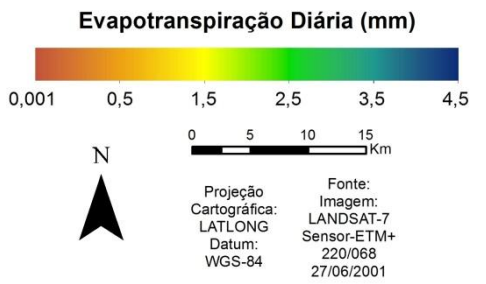


Mata Ciliar/Cerradão

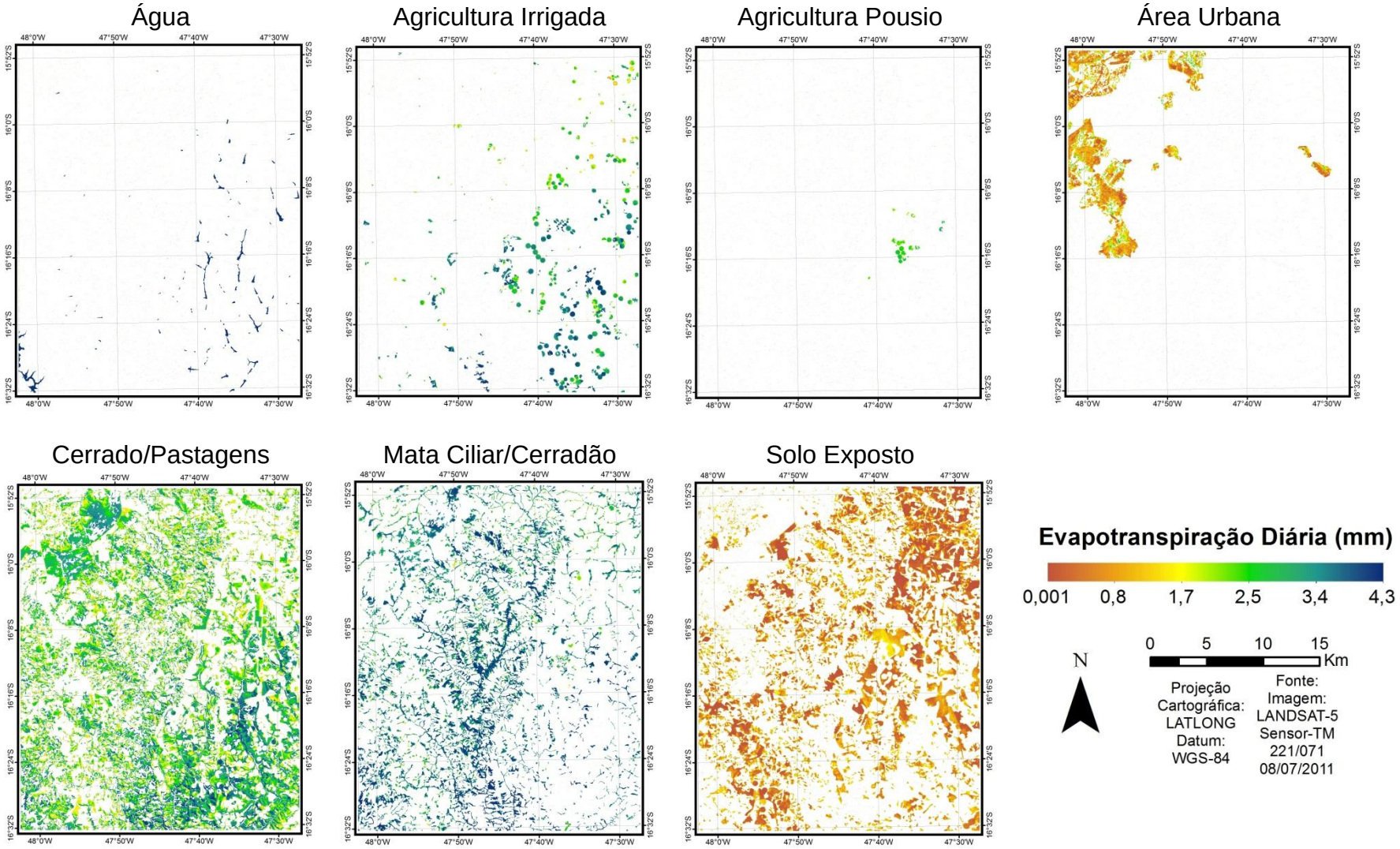


Solo Exposto

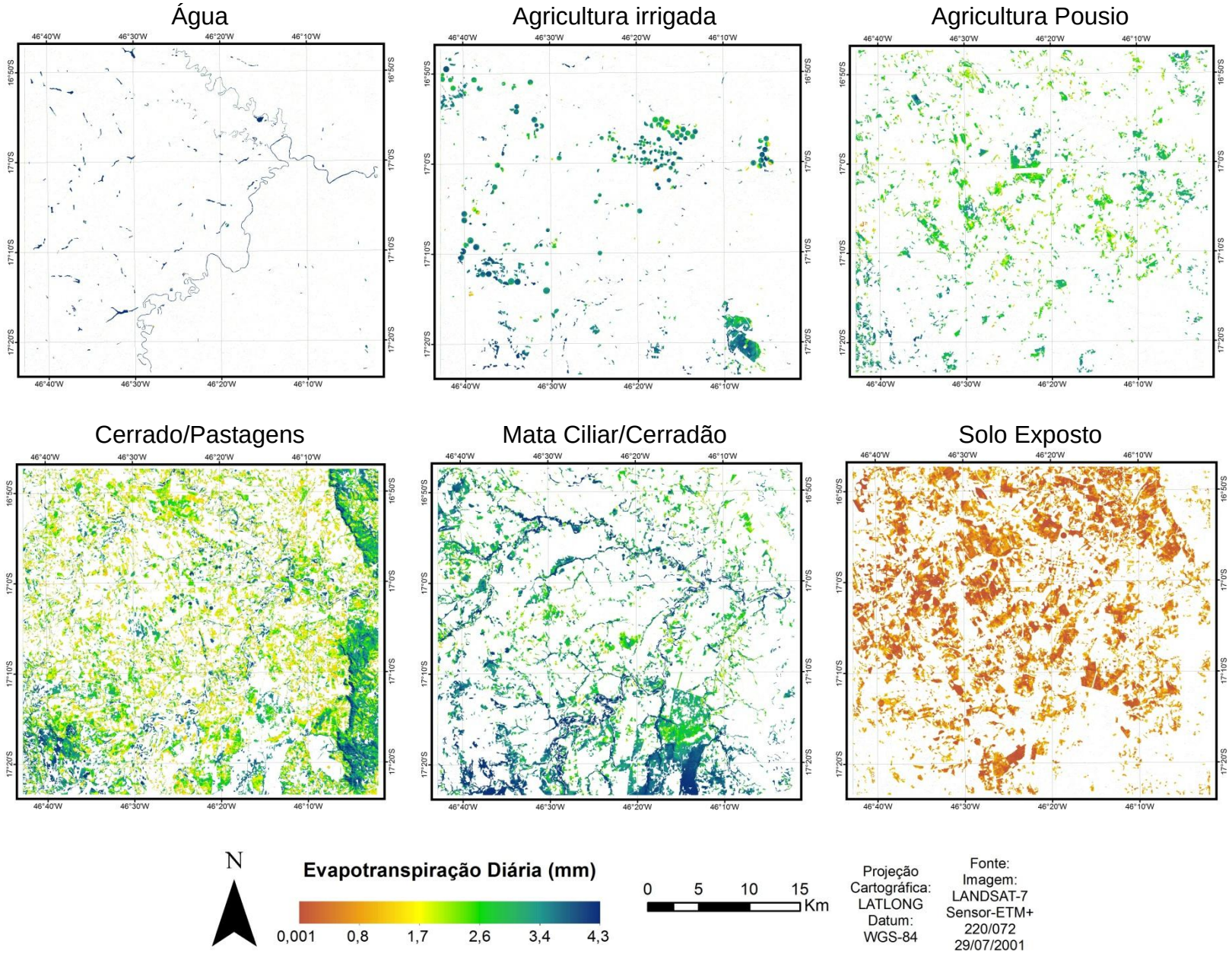




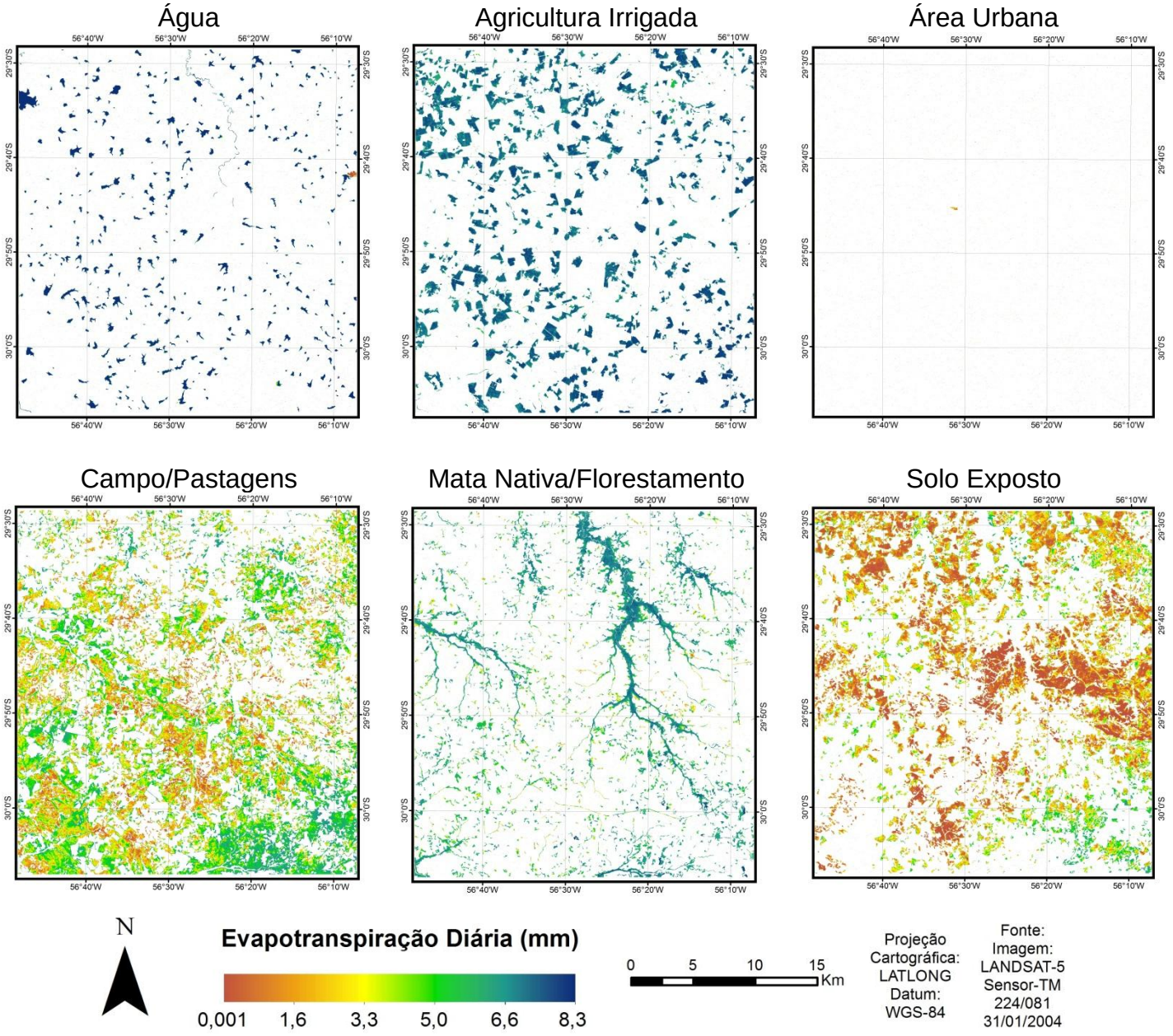
APÊNDICE B – Distribuição espacial da ET_d na área de Goiás/Brasília em diferentes classes de uso e cobertura da terra



APÊNDICE C – Distribuição espacial da ET_d na área de Minas Gerais em diferentes classes de uso e cobertura da terra

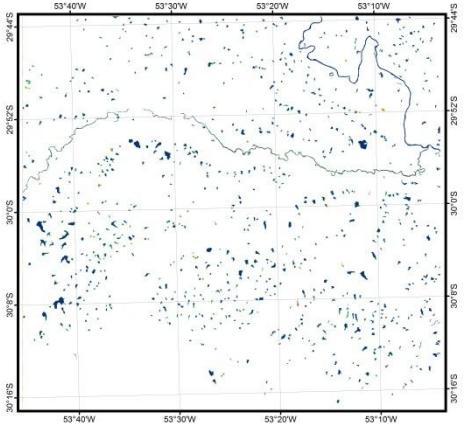


APÊNDICE D – Distribuição espacial da ET_d na área da Fronteira Oeste (RS) em diferentes classes de uso e cobertura da terra

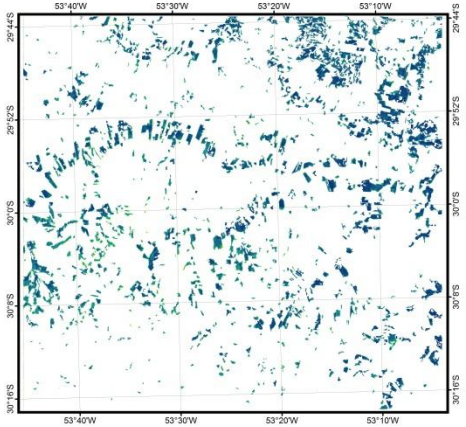


APÊNDICE E – Distribuição espacial da ET_d na área da Região Central (RS) em diferentes classes de uso e cobertura da terra

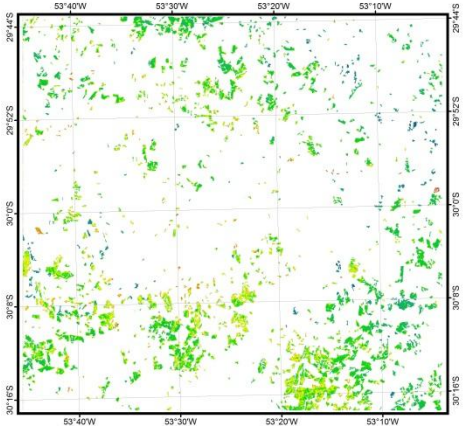
Água



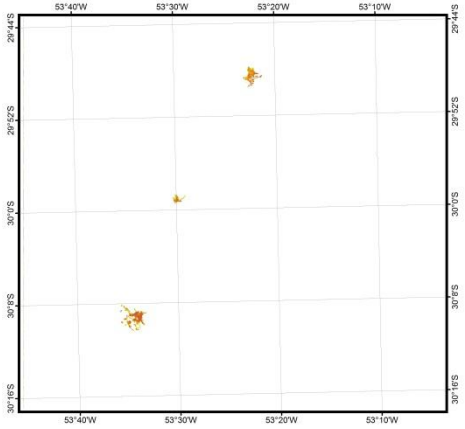
Agricultura Irrigada



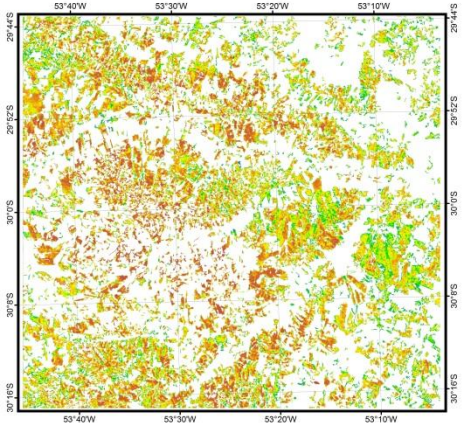
Agricultura Sequeiro



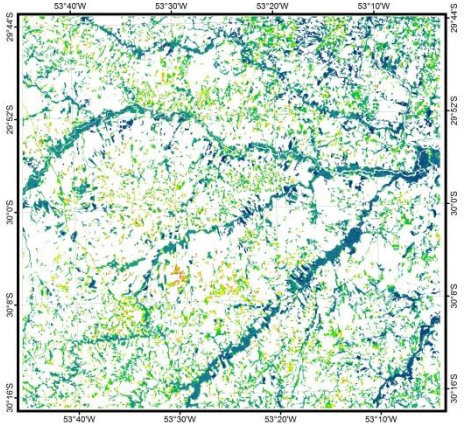
Área Urbana



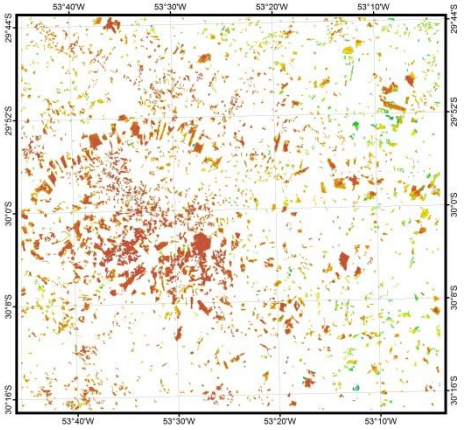
Campo/Pastagens

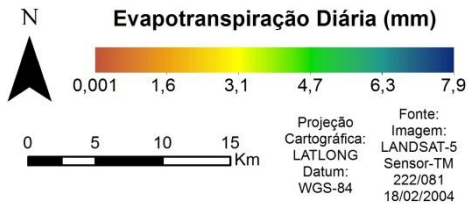


Mata Nativa/Florestamento



Solo Exposto





APÊNDICE F – Distribuição espacial da ET_d na área do Extremo Sul (RS) em diferentes classes de uso e cobertura da terra

