

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Parer

Este exemplar corresponde a judicial final da dissertação
Mestrado defendida por Carlos Alberto Soares de Almeida e a
vada pela Comissão Julgadora em 30 de agosto de 1996
Campinas, 10 de dezembro de 1996.


Presidente da Banca

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE
CULTIVADA COM TRIGO (*Triticum aestivum* L.),
USANDO DADOS NOAA-14/AVHRR**

POR

CARLOS ALBERTO SOARES DE ALMEIDA

Campinas, SP
Agosto de 1996

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE
CULTIVADA COM TRIGO (*Triticum aestivum* L.),
USANDO DADOS NOAA-14/AVHRR**

POR
CARLOS ALBERTO SOARES DE ALMEIDA

Orientador :
Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto

Dissertação apresentada em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, Área de concentração : Água e Solo.

Campinas, SP
Agosto de 1996



UNIDADE	73C
N.º CHAMADA:	Unicamp
AL	64e
V.	Ex.
TOMBO BC/	31.903
PROC.	281/97
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	21/10/97
N.º CPD	

CM-00101431-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL64e

Almeida, Carlos Alberto Soares de
Estimativa da temperatura de superfície cultivada
com trigo (*Triticum aestivum* L.), usando dados
NOAA-14/AVHRR / Carlos Alberto Soares de
Almeida.—Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Hilton Silveira Pinto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sensoriamento remoto. 2. Satélites meteorológicos.
3. Espectro infravermelho. 4. Temperatura. 5. Trigo. I.
Pinto, Hilton Silveira. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

*A minha vida tem um encanto, uma felicidade muito grande:
ela participa da história de três gerações de mulheres.
Três mulheres que, juntas, em inocência ou sabedoria
(ainda não me foi dado aprender a diferença),
criaram e mantêm a vida do
que há de melhor em mim.*

*Para
minha mãe, Doralice,
minha irmã, Sônia e
minha sobrinha, a pequena Maria Eugênia.*

Com muita Alegria.

*... E nessa minha vida também gozo de outras Alegrias.
As quais, tivesse eu a habilidade de alguns de meus maiores ídolos,
colocaria todas numa única composição. Musical ou plástica.
Cada uma dessas Alegrias guardando a sua identidade, o seu nome.
Mariella, Adriana, DiCastro, Patricia-Mulé.
Sem ordem ou prioridades. Apenas todas lá. Lógicas.
Como as proparoxítonas de Chico Buarque
ou as pinceladas corretas de um Van Gogh
(ainda não me foi dado aprender a diferença).
Juntas, num só material.
Para que pudessem ser admiradas por quem quer que seja
e amadas como eu as amo.*

*Este trabalho também é dedicado a essas Alegrias
e àquela que ainda está prá chegar...*

*Em especial,
a todos aqueles que já estiveram "Walking On The Wild Side".*

... Ainda, a minha **Gratidão**

ao meu orientador, o Professor Hilton Silveira Pinto, não só por ter me dispensado uma valorosa parte de sua grande experiência acadêmica e científica, mas também pelo crédito, pela amizade e por toda a segurança transmitida;

ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida;

à Feagri, Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, pela oportunidade da realização deste trabalho e em especial à Coordenadoria de Pós-graduação por todo apoio recebido;

ao Projeto “Cimatological and Hydrological Determinants of Agricultural Production in South-America Remote Sensing and Numerical Simulation” coordenado pela União Europeia, pelo fundamental apoio financeiro que possibilitou desde a compra de equipamentos às viagens para a apresentação de trabalhos relacionados a esta dissertação;

à Cooperativa Agro Industrial Holambra, de Holambra II, nas pessoas dos engenheiros Paulo Fortes, Guido Sanches e Gustavo S. Bacchi pela grande ajuda durante toda a dura fase de coleta de dados no campo;

ao Senhor Theodorus W. Swart, proprietário da fazenda Alto do Rincão, em Holambra II, por toda a gentileza, liberdade de trabalho e cooperação. Em especial, pelo reconhecimento da importância da produção científica, para o nosso país.

ao Cepagri, Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da Unicamp, pelas excelentes e privilegiadas condições de trabalho e por me proporcionar a rica oportunidade de ter conhecido as pessoas que ali conheci. Pessoas que foram capazes da proeza de me aturar por mais de dois anos, sem reclamar (muito), veja só !!! De colegas de trabalho, essas pessoas foram aos poucos se tornando amigas muito, muito queridas e por isso quero destacá-las, uma a uma, num agradecimento particular e muito especial. São elas:

Jurandir Zullo Júnior. Por todo o companheirismo, respeito, paciência (principalmente) e pela inestimável ajuda, que pode tranqüilamente colocá-lo como um dos co-autores deste trabalho. Valeu, Jura !! Aquele abraço prá voce, prá Rosário e um beijo especial prá pequena Maria Isabel.

Emilia Hamada. Não só pelas sugestões sempre muito pertinentes e dotadas de invejável cuidado e experiência. Mas, e mais, pelas palavras tão amigas que pode ter certeza, Emily, vou guardar PRÁ SEMPRE no meu coração. Beijão enorme!! Adoro você !!

Giampaolo Q. Pellegrino, o Xiam-Bolla, que além da memória prodigiosa, sempre me impressionou pelo seu brilhantismo e simplicidade (muito bem aproveitados neste trabalho). Essas seriam as principais fontes da minha grande admiração por esse rapaz, não fossem a incomum beleza que ele traz no coração e o manual do Excel que tem inteirinho na cabeça. Abração, Giam !!

Edilene Carneiro, cuja sensibilidade sempre me foi muito transparente, me chamando a atenção pelos extremos respeito e seriedade com que trabalha. Valeu mesmo, Édi: por todos os altos galhos quebrados e principalmente pelo carinho de todas as festinhas de aniversário !! Beijão Enorme !!

Claudir. Esse rapaz que também muito me admira: bom pai, bom marido e acima de tudo, excelente funcionário. Toda a sua prestatividade, eficiência e simpatia também contribuíram para a realização deste trabalho. Valeu, Clau !!

Wilson "Vicente", que além de nos conduzir, sempre paciente, deu a maior mão nos trabalhos de campo.

Assim também foi com o Zézinho, motorista do Centro de Computação por nós "adotado", não só pela excelente qualidade dos seus serviços, na estrada e no trigal, mas também pelo seu grande humor demonstrado em todo o sol, suor ("no cloud contaminations") e cerveja.

Finalmente, aos colegas de "Pós" da Feagri, em particular ao velho e bom Lagra's, à Leila, Ester, Adriana-Cacá e Silvana. Por todo o carinho recebido e pela oportunidade de poder estar sempre o devolvendo. Grande beijo.

Muito, Muito obrigado a todos !!!

*Carlos Alberto Soares de Almeida,
agosto de 1996.*

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
RESUMO	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. A cultura do trigo	3
2.1.1. A planta do trigo: classificação botânica	3
2.1.2. A importância da cultura	3
2.2. A temperatura de superfície e o balanço de energia	5
2.3. A temperatura de superfície como determinante da Razão de Bowen	8
2.3.1. Razão de Bowen: um comportamento indicativo do estado de hidratação da superfície	11
2.4. Os balanços hídrico e de energia em função da evapotranspiração	12
2.4.1. A aplicabilidade dos valores de evapotranspiração	13

2.4.2. Uma análise de métodos empregados na estimativa da evapotranspiração	15
2.5. O sensoriamento remoto orbital como ferramenta para estimativa da temperatura de superfície	17
2.6. os fundamentos físicos do sensoriamento remoto orbital da radiação de ondas longas	18
2.6.1. As perturbações atmosféricas	19
2.6.1.1. As janelas espectrais	22
2.7. O sistema NOAA/AVHRR	24
2.8. O processamento digital das imagens	28
2.8.1. O geo-referenciamento	28
2.8.2 A obtenção do valor de temperatura de superfície	29
2.8.3. A correção das imagens devido aos efeitos atmosféricos e de emissividade: o método <i>split-window</i>	30
3. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 As características do local	34
3.1.1. A área de trabalho	34
3.2 A cultura e a sua condução	34
3.3. A programação das visitas ao campo e a seleção das passagens do satélite	35
3.4. A condução das medidas e o equipamento utilizado	38
3.4.1. As medidas de temperatura de superfície	39
3.4.2. As medidas de velocidade do vento, psicrométricas e de temperatura da folha	40
3.5. As medidas termográficas, higrográficas e pluviométricas	41

3.6. O processamento das imagens	42
3.6.1. O geo-referenciamento das imagens	42
3.6.2. Os cálculos para o valor da temperatura de superfície ...	48
3.6.3. A equação típica de <i>split-window</i> e a emissividade da superfície	48
3.7. O tratamento e análise dos dados	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Resultados gerais	51
4.2. O geo-referenciamento	52
4.3. A T_s medida no campo e as temperaturas do ar, umidade absoluta do ar e velocidade do vento	61
4.4. A temperatura da folha e as umidades absoluta e relativa do ar ...	65
4.5. A T_s corrigida pelo método <i>split window</i> e a temperatura do ar, a umidade absoluta do ar e o ângulo de visada	67
4.6. As temperatura de superfície medida no campo, a temperatura da folha e a corrigida pelo método <i>split window</i>	69
4.7. As temperaturas de superfície não-corrigidas calculadas para cada canal infravermelho-distante do sensor	72
4.8. T_{campo} em função das variáveis T_{folha} , U_{absoluta} , $T_{\text{psicrômetro}}$ e V_{Vento} e a equação da estimativa da T_s cultivada com trigo, usando dados NOAA-14/AVHRR	77
5. CONCLUSÕES	81
6. ANEXOS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ABSTRACT	101

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
2.1.	Representação esquemática dos balanços de fluxo de onda curta e de onda longa.	6
2.2.	O espectro da radiação eletromagnética.	19
2.3.	Variação da excitância espectral dos corpos negros em função da sua temperatura - Lei de Wien.	20
2.4.	Espectros de absorção do CO, CH ₄ , N ₂ O, O ₃ , CO ₂ e H ₂ O ao longo de um caminho vertical através da atmosfera.	22
2.5.	Curva da radiação emitida pela Terra em comparação com a curva de radiação emitida por um corpo negro a 300 K, posicionado no topo da camada atmosférica.	23
2.6.	Bandas espectrais do sensor AVHRR superpostas ao espectro de transmissão da radiação emitida pela superfície terrestre.	24
3.1.	Estação terrestre de recepção de imagens (Cepagri/Unicamp - Campinas - SP) e Área de trabalho (Cooperativa Holambra II - Paranapanema - SP) representadas em imagem NOAA-14/AVHRR-LAC/HRPT, setorizada para o Estado de São Paulo, canal 2 - infravermelho-próximo, feita em 14 de agosto de 1995, às 14h09 (horário local).	36

3.2.	Represa de Jurumirim e área de trabalho (detalhe) em imagem Landsat TM 4R 5G 3B, do dia 13 de agosto de 1995.	37
3.3.	Representação esquemática da instalação do termômetro de radiação infravermelha no campo cultivado.	40
3.4.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.	45
3.5.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	45
3.6.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	46
3.7.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.	46
3.8.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	47
3.9.	Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	47

4.1.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.	56
4.2.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	56
4.3.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	57
4.4.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.	57
4.5.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	58
4.6.	Matrizes 7x7 de valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	58
4.7.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.	59
4.8.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	59

4.9.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.	59
4.10.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.	60
4.11.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	60
4.12.	Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método <i>split window</i> para a imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.	60
4.13.	Reta de ajuste de $T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C}) \times T_{\text{psicr\u00f4metro}} (^{\circ}\text{C})$	62
4.14.	Reta de ajuste de $T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C}) \times T_{\text{campo}} (\text{K})$	62
4.15.	Reta de ajuste de $U_{\text{absoluta}} (\text{g}/\text{m}^3) \times T_{\text{campo}} (\text{K})$	64
4.16.	Reta de ajuste de $V_{\text{vento}} (\text{m}/\text{min}) \times T_{\text{campo}} (\text{K})$	64
4.17.	Reta de ajuste de $T_{\text{folha}} (^{\circ}\text{C}) \times T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C})$	66
4.18.	Reta de ajuste de $T_{\text{folha}} (^{\circ}\text{C}) \times U_{\text{relativa}} (\%)$	66
4.19.	Reta de ajuste de $T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C}) \times T_{\text{split window}} (\text{K})$	68
4.20.	Reta de ajuste de $U_{\text{absoluta}} (\text{g}/\text{m}^3) \times T_{\text{split window}} (\text{K})$	68
4.21.	Reta de ajuste de $A_{\text{visada}} (^{\circ}) \times T_{\text{split window}} (\text{K})$	70

4.22.	Reta de ajuste de $T_{split\ window}$ (K) x T_{campo} (K).	70
4.23.	Reta de ajuste de T_{campo} (K) x T_{folha} (°C).	71
4.24.	Reta de ajuste de $T_{split\ window}$ (K) x T_{folha} (°C).	71
4.25.	Reta de ajuste de T_{canal4} (K) x T_{campo} (K).	73
4.26.	Reta de ajuste de T_{canal5} (K) x T_{campo} (K).	73
4.27.	Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m ³) x T_{canal4} (K).	74
4.28.	Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m ³) x T_{canal5} (K).	74
4.29.	Reta de ajuste de A_{visada} (°) x NC_{canal4}	76
4.30.	Reta de ajuste de A_{visada} (°) x NC_{canal5}	76
4.31.	Reta de ajuste de A_{visada} (°) x T_{canal4}	78
4.32.	Reta de ajuste de A_{visada} (°) x T_{canal5}	78
6.1.	Dados coletados nos meses de junho, julho e agosto, pelo termógrafo instalado em abrigo meteorológico.	85
6.2.	Dados coletados nos meses de junho, julho e agosto, pelo higrógrafo instalado em abrigo meteorológico.	86
6.3.	Dados de precipitação coletados pelo pluviômetro instalado em local próximo ao abrigo meteorológico e dados de irrigação.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1. Comparação entre os horários de passagens dos satélites em duas datas diferentes	25
2.2. Resolução espectral para cada um dos canais do sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA-14	27
3.1. Passagens selecionadas do satélite NOAA-14, captadas pela estação terrestre de recepção situada no Cepagri/Unicamp ...	38
4.1. Resultados das análises de regressão linear simples entre parâmetros medidos e estimados	53
4.2. Valores intermediários usados nos cálculos das temperaturas de superfície fornecidas por cada imagem e corrigidas pelo método <i>split window</i>	54
4.3. Resultados das análises estatísticas feitas para cada matriz 7x7 obtida após os trabalhos de localização do <i>pixel</i> de trabalho	55
4.4. Resultados das análises de regressão linear múltipla entre T_{campo} e T_{folha} ; U_{absoluta} ; $T_{\text{psicrômetro}}$; V_{vento} e entre T_{campo} e NC_{canal4} ; NC_{canal5}	79

6.1.	Coefficientes de correção do valor de R_{lin} , específicos para cada um dos canais infravermelhos do sensor AVHRR	89
6.2.	Termos representativos das características da atmosfera existente entre a superfície e o sensor do satélite, determinados para quatro modelos atmosféricos	89
6.3.	Resultados das análises de regressão linear simples entre os parâmetros medidos e estimados.	90
6.4.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e $T_{psicrômetro}$	91
6.5.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e T_{campo}	91
6.6.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e T_{campo}	91
6.7.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e T_{folha}	91
6.8.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e $T_{split window}$	91
6.9.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e $T_{split window}$	91
6.10.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e T_{canal4}	92
6.11.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e T_{canal5}	92

6.12.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e $T_{split\ window}$.	92
6.13.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $T_{split\ window}$ e T_{campo} .	92
6.14.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{campo} e T_{folha} .	92
6.15.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $T_{split\ window}$ e T_{folha} .	92
<hr/>		
6.16.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{canal4} e T_{campo} .	93
6.17.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{canal5} e T_{campo} .	93
6.18.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e NC_{canal4} .	93
6.19.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e NC_{canal5} .	93
6.20.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e T_{canal4} .	93
6.21.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e T_{canal5} .	93
6.22.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre V_{vento} e T_{campo} .	94

6.23.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{relativa}$ e T_{folha}	94
6.24.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre NC_{canal4} ; NC_{canal5} e T_{campo}	94
6.25.	Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre V_{vento} ; T_{folha} ; $T_{psicrômetro}$ e T_{campo}	94

LISTA DE SÍMBOLOS

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer.</i>
A_{visada}	Ângulo de visada ($^{\circ}$) do sensor AVHRR no momento da passagem.
Cepagri	Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura.
<hr/>	
GAC	<i>Global Area Coverage data - Reduced Resolution Recorded AVHRR.</i>
GMT	<i>Greenwich Meridian Time.</i>
GSC	<i>General Sciences Corporation.</i>
HIRS/2	<i>High Resolution Infrared Radiation Sounder / 2 HRPT High Resolution Picture Transmission.</i>
IAC	Instituto Agrônômico de Campinas.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View.</i>
LAC/HRPT	<i>Large Area Coverage - High Resolution Recorded HRPT/AVHRR.</i>
METPRO	<i>Professional Meteorological Information Processing System.</i>
MSU	<i>Microwave Sounding Unit.</i>

NC_{canal4}	Nível de cinza do <i>pixel</i> de trabalho - canal 4.
NC_{canal5}	Nível de cinza do <i>pixel</i> de trabalho - canal 5.
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
NPK	Nitrogênio; Fósforo; Potássio.
SST	<i>Sea Surface Temperature.</i>
SSU	<i>Stratospheric Sounding Unit.</i>
<hr/>	
T_{abrigo}	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) medida por termógrafo, em abrigo meteorológico.
T_{campo}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida no campo.
T_{canal4}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 4 do sensor.
T_{canal5}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 5 do sensor.
TIROS	<i>Television and InfraRed Observation Satellite.</i>
TOVS	<i>TIROS Operational Vertical Sounder.</i>
$T_{\text{psicrômetro}}$	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) medida com psicrômetro de aspiração.
T_s	Temperatura de superfície.

$T_{split\ window}$ Temperatura radiativa de superfície (K) corrigida pelo método *split window*.

$U_{absoluta}$ Umidade absoluta do ar (g/m^3).

Unicamp Universidade Estadual de Campinas.

$U_{relativa}$ Umidade relativa do ar (%).

UTM (projeção) Universal Transversa de Mercator.

V_{vento} Velocidade do vento (m/min).

RESUMO

A estimativa de temperatura de superfície do dossel vegetativo (Ts), pode ser aplicada à análise de parâmetros agroclimáticos, comumente utilizados para a avaliação da evapotranspiração, umidade do solo e controle da irrigação. O sensor AVHRR trabalha com cinco canais de imageamento. Dois deles, os canais 4 e 5, captam energia eletromagnética terrestre na faixa infravermelha distante do espectro, própria ao estudo de temperatura de superfícies vegetadas. No presente trabalho, foram utilizadas séries de imagens diurnas e noturnas, fornecidas pelos sensores AVHRR a bordo do satélite NOAA-14. Para a obtenção dos valores finais de Ts, as imagens foram processadas em softwares adequados ao tratamento de produtos NOAA-AVHRR. O processamento incluiu o georeferenciamento das imagens e as correções atmosféricas, para as quais se utilizou o método de correção *split window*. Um radiômetro de campo foi utilizado nas medidas da Ts feitas *in situ*, por ocasião das passagens do satélite. Os dados orbitais de Ts já corrigidos, foram submetidos a análise de regressão contra os dados terrestres do mesmo parâmetro. Foram observados altos graus de associação entre a Ts medida no campo e a temperatura da folha e do ar próximo à superfície. A alta correlação entre a Ts medida no campo e a obtida a partir das imagens indicou que a equação de *split window* usada corrigiu satisfatoriamente as imagens quanto aos efeitos atmosféricos. Foi sugerida uma equação para a estimativa da temperatura de superfície cultivada com trigo, usando dados NOAA-14/AVHRR, para as condições experimentais em que as medidas foram coletadas.

*“Continuo a pensar que quando tudo
parece sem saída, sempre se pode cantar.
Por essa razão escrevo.”*

*Caio Fernando Abreu
Pequenas Epifanias*

CAPÍTULO 1.

INTRODUÇÃO

O sucesso no planejamento de atividades agrícolas não depende apenas do uso do que há de mais avançado em tecnologia de produção. Aumentos de produtividade só podem ser esperados se esta tecnologia for utilizada racionalmente. Para tanto é importante estar atento ao comportamento da cultura durante todas as fases do seu ciclo no campo. Esse comportamento vai depender grandemente da forma como a vegetação vai responder às variações dos fenômenos atmosféricos aos quais ela permanecerá exposta. Os efeitos produzidos na lavoura por esta variabilidade climática serão melhor avaliados se ela for submetida a um trabalho de monitoramento contínuo. Esse cuidado certamente trará subsídios para tomadas de decisão que garantam um bom desenvolvimento da cultura.

A temperatura de superfície é notadamente um parâmetro meteorológico influenciador da fenologia e indicador do estado hídrico da planta. Assim, a sua estimativa é de grande utilidade em trabalhos de monitoramento que assegurem o atendimento da demanda hídrica das culturas.

Grande parte do trigo produzido hoje no país é cultivada sob regime de irrigação artificial. A estimativa da temperatura de superfície para esta cultura, pode contribuir (direta ou indiretamente) em programas de irrigação baseados no monitoramento da vegetação levando a melhores produtividades para os campos de trigo.

O sensor AVHRR a bordo dos satélites da série NOAA, por operar na faixa infravermelho-distante do espectro eletromagnético, pode ser utilizado em estudos de temperatura de superfície. Em comparação aos dados fornecidos por outros satélites, a alta resolução temporal das plataformas NOAA e a baixa resolução espacial de suas imagens podem fornecer informações sobre o estado da vegetação em escalas globais ou regionais e em maior frequência. Essas características dos produtos AVHRR podem tornar os trabalhos de monitoramento agroclimático mais ágeis e portanto mais eficientes.

Este trabalho tem como objetivo propor uma equação de estimativa de temperatura de superfícies de trigo, nas condições climáticas de Paranapanema-SP, usando dados NOAA /AVHRR. Isto foi realizado buscando correlacionar os dados de temperatura de superfície corrigida quanto ao efeito atmosférico, medidas pelo sensor do satélite, às medidas feitas no campo. Foi verificada a influência da velocidade do vento, da temperatura do ar e da umidade absoluta do ar nas variações encontradas nos dados coletados de temperatura de superfície da população vegetal estudada.

*“Chego ao lago da memória
Que tem água pura e fresca
E digo aos guardiões da entrada:
— Sou filho da terra e do céu.
Dai-me de beber que tenho uma sede sem fim.”*

*Renato Russo
A Fonte*

CAPÍTULO 2.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do trigo.

2.1.1. A planta do trigo: classificação botânica.

O trigo é um Angiosperma, da classe das Monocotiledôneas, pertencente à ordem Cereales, família Gramineae, tribo Hordéas e ao gênero *Triticum*. A espécie cultivada no Brasil, *Triticum aestivum* L., apresenta uma grande variabilidade genética, permitindo a sua adaptação nos mais diversos tipos de ambiente (SOBRINHO & SOUZA, 1983).

2.1.2. A importância da cultura.

A produção mundial de trigo é liderada por países como a China, os Estados Unidos da América, Canadá, Austrália, França e Argentina. No início dos anos 80, o Brasil era responsável por aproximadamente 1% da produção mundial de grãos de trigo, podendo este valor ser considerado como insignificante dentro do panorama internacional da comercialização do produto (FERNANDES, 1983). Este quadro era verificado, mesmo considerando a participação dos Estados do sul do Brasil, como o Rio Grande do Sul, Paraná e São Paulo, responsáveis pela maior parte do trigo produzido no país, na época.

Ainda assim, já se esperava que a participação brasileira na produção mundial aumentasse gradativamente, não só pela expansão do cultivo nas regiões já tradicionais do sul do país, mas também pela incorporação de novas áreas de plantio nos Estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais (TOMASINI, 1982). De fato, este aumento na produção nacional foi observado nas safras de 1987 a 1988, atingindo respectivamente 6,1 e 5,5 milhões de toneladas, o que se aproximava, consideravelmente, do consumo interno de 6,3 milhões de toneladas, conforme estimativas da época (FGV, 1988).

Em outubro de 1995, o suplemento agrícola do jornal "O Estado de São Paulo" publica que a redução nos estoques de trigo dos EUA naquele ano contribuiu para o forte aumento verificado nas cotações do produto. Essas cotações eram as melhores desde 1988, atingindo R\$ 9,60 a saca. As más condições climáticas para a produção da cultura na Argentina contribuíram para essa alta nos preços do trigo produzido no Brasil. O mesmo artigo indica que, para setembro de 1995, os valores das cotações alcançadas foram 22% maiores que os do mesmo mês em 1994 e 36% superiores em relação a setembro de 1993. Também superaram em 12% os preços de setembro de 1992 e 48% quando comparados com as cotações obtidas em 1991 (AGROMARKET, 1995).

O mesmo jornal publica logo mais, em novembro de 1995, que para as primeiras semanas daquele mês, o preço do trigo pago ao produtor do Estado do Paraná atingiu a média de R\$ 11,00 a saca, acumulando uma alta de 42,5% em relação a novembro do ano anterior. Esta alta do preço do produto no mercado levou a um aumento no poder de compra do trigo, tornando-o uma das melhores alternativas para o financiamento da safra de verão (AGROMARKET, 1995a). Esses melhores preços passaram a estimular maiores investimentos na produção da cultura e em maio de 1996, já se previa uma expansão de 56,7% da área cultivada, em relação ao ano anterior (AGROMARKET, 1996).

A cultura do trigo tem se mostrado ainda, uma boa opção para o plantio em práticas de rotação de culturas, com o milho e a soja. Tem se observado o interesse na utilização da sua parte aérea como palhada de cobertura para o plantio direto das culturas de verão. Esses fatos, associados ao aquecimento econômico assistido no setor tritícola, têm incentivado o cultivo do cereal.

Considerando esses aspectos, pode-se visualizar a importância da obtenção de produtividades cada vez maiores para as áreas atualmente destinadas à produção de trigo. Nesse sentido, trabalhos de monitoramento no campo, que forneçam dados de aplicação direta ou indireta, em programas de tratamento da cultura, são desejáveis.

2.2. A temperatura de superfície e o balanço de energia.

“A emissão radiante total de um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta.”

Este enunciado, bastante simples e igualmente conhecido, descreve a lei da emissão eletromagnética ou “Lei de Stefan-Boltzmann”, representada por :

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.1)$$

onde Φ é a radiação emitida (W/m^2), ε é a emissividade do corpo, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2} K^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e T , a temperatura do corpo em graus Kelvin (CAMPBELL, 1977).

Uma superfície vegetada que recebe radiação solar direta e difusa, se aquece e emite radiação obedecendo a essa lei. Esse fato é expresso claramente no balanço da radiação vertical em ondas longas (B_L), que compreende duas componentes: a contra-radiação atmosférica ($L\downarrow$) e a emissão terrestre ($L\uparrow$). A figura 2.1 representa esquematicamente as trocas de energia que ocorrem na

superfície, facilitando a visualização do processo de balanceamento de radiação eletromagnética. Esse balanceamento tem como resultante, o valor da radiação líquida disponível sobre a superfície, conforme explicado a seguir, pelas equações 2.2 a 2.9.

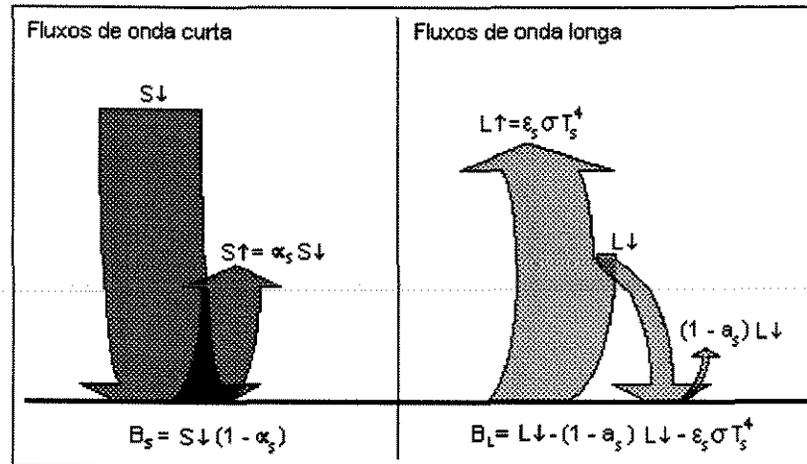


Figura 2.1. Representação esquemática dos balanços de fluxo de onda curta e de onda longa.

Fonte: adaptada de BAEZA (1993).

Assim, o balanço da radiação em ondas longas é dado pela equação:

$$B_L = L \downarrow - L \uparrow \quad (2.2)$$

que representa a soma algébrica entre o fluxo de ondas longas que atinge a superfície ($L \downarrow$), convencionalmente de sinal positivo e o fluxo de ondas longas que a deixa ($L \uparrow$), conseqüentemente de sinal negativo.

O primeiro somando da equação de B_L é função, basicamente da temperatura do ar, da quantidade de vapor d'água presente na atmosfera e da cobertura de nuvens. A radiação emitida pela superfície ou emitância terrestre, por sua vez, depende da sua temperatura (T_s) e da sua emissividade (ϵ_s) (VIANELLO & ALVES, 1991), conforme atestado pela Lei de Stefan-Boltzmann e

também da sua absorptividade (a_s) (BAEZA, 1993), permitindo que o segundo somando da equação 2.2 seja escrito da seguinte maneira:

$$L\uparrow = L\downarrow - L\downarrow \cdot a_s + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.3)$$

e conseqüentemente,

$$L\uparrow = (1 - a_s) L\downarrow + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.4)$$

Substituindo a equação 2.4 na equação 2.2 obtém-se que:

$$B_L = L\downarrow - (1 - a_s) L\downarrow + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.5)$$

BAEZA (1993) sugere a simplificação da equação anterior pela Lei de Kirchoff, para a qual $a_s = \varepsilon_s$ e reduzindo a equação 2.5 para:

$$B_L = \varepsilon_s \cdot (L\downarrow - \sigma \cdot T_s^4). \quad (2.6)$$

A radiação líquida sobre a superfície (R_N), disponível aos processos naturais, dentre eles a evaporação (OMETTO, 1981), é quantificada como:

$$R_N = B_s + B_L \quad (2.7)$$

onde B_s é o saldo da radiação solar de ondas curtas ou balanço dos fluxos de ondas curtas que chegam à superfície. Este termo é definido como se segue:

$$B_s = \downarrow S \cdot (1 - \alpha_s) \quad (2.8)$$

sendo que $\downarrow S$ é a radiação solar de ondas curtas que chega à superfície (representada pela soma da radiação difusa com a radiação direta), de sinal positivo. Quando $\downarrow S$ é multiplicado pelo coeficiente de reflexão ou albedo da

superfície (α_s), passa a representar o total de radiação de ondas curtas que é refletida deixando a superfície, logo, de sinal negativo.

Substituindo as equações 2.6 e 2.8 na expressão 2.7, chega-se a :

$$R_N = \downarrow S (1 - \alpha_s) + \varepsilon_s (L\downarrow - \sigma \cdot T_s^4). \quad (2.9)$$

2.3. A temperatura de superfície como determinante da razão de Bowen.

O saldo da radiação disponível é distribuído pelos diversos processos que dela se utilizam na superfície. Uma parte da radiação líquida é destinada ao fluxo de calor no solo, por condução (G). Uma outra parcela é utilizada no aquecimento do ar por transferência de calor, que pode se realizar tanto por condução quanto por convecção (calor sensível - H). Uma terceira parte do saldo de radiação é o fluxo de calor latente (λE), utilizado nos processos de evaporação da água. Para essa fração da energia disponível, E representa o fluxo turbulento de vapor d'água e λ , o calor latente de vaporização (GUYOT & SEGUIN, 1988; BAEZA, 1993). Assim, o balanço de energia global (B_{EG}) pode ser representado da seguinte forma:

$$B_{EG} = R_N - G - H - \lambda E. \quad (2.10)$$

Considerando que R_N é toda aproveitada nos processos acima descritos, obedecendo ao princípio de conservação de energia, pode-se igualar o termo B_{EG} a zero e reescrever equação 2.10:

$$R_N = G + H + \lambda E. \quad (2.11)$$

É possível determinar experimentalmente os valores de R_N e de G. Entretanto o valor de H é impossível de ser medido na prática pois as leis que regem o fluxo de calor nos gases não podem ser usadas para prever o fluxo de calor sensível na atmosfera, considerando que a mesma é um sistema

aberto (MOTA, 1981); o valor de λE também é de difícil medição (OMETTO, 1981), o que leva à necessidade de se estimarem esses valores. Essa estimativa pode ser feita usando-se o método da razão de Bowen (β) que relaciona os termos H e λE e é dada por:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E}. \quad (2.12)$$

Sendo:

$$H = \rho \cdot c_p \cdot K_H \frac{\delta T}{\delta z} \quad (2.13)$$

$$\lambda E = \rho \cdot \lambda \cdot K_\lambda \frac{\delta e}{\delta z} \quad (2.14)$$

e para estes:

ρ = densidade do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c_p = calor específico à pressão constante ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

$\frac{\delta T}{\delta z}$ = gradiente de temperatura (K);

$\frac{\delta e}{\delta z}$ = gradiente de umidade específica ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$);

K_H = coeficiente de transferência de calor sensível;

K_λ = coeficiente de transferência de calor latente;

λ = calor latente de evaporação ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Substituindo (2.13) e (2.14) em (2.12), assumindo K_H como sendo igual a K_λ e eliminando os termos comuns, se chega em:

$$\beta = \frac{cp \cdot \Delta T}{\lambda \cdot \Delta e} \quad (2.15)$$

Tendo a relação $\frac{cp}{\lambda}$ como equivalente à constante psicrométrica (γ), de valor igual a $0,66 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$ (MOTA, 1981), a razão de Bowen passa a ser escrita da seguinte forma:

$$\beta = \frac{\gamma \cdot \Delta T}{\Delta e} \quad (2.16)$$

onde ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície evaporante e a do ar atmosférico; e Δe , o déficit de saturação ou a diferença entre tensão de saturação e a tensão atual do vapor d'água atmosférico (OMETTO, 1981).

Assim:

$$\beta = \frac{\gamma(T_s - T_A)}{e_s - e_A} \quad (2.17)$$

Pela equação 2.12:

$$H = \beta \cdot \lambda E \quad (2.18)$$

que quando substituído na equação (2.11) de balanço de energia global para B_{EG} igual a zero, leva a:

$$R_N = G + \beta \cdot \lambda E + \lambda E \quad (2.19)$$

O fluxo de vapor d'água pode ser estimado pela equação 2.19 que, rearranjada, fica:

$$\lambda E = \frac{R_N - G}{\beta + 1}. \quad (2.20)$$

Analogamente, obtém-se que:

$$H = \frac{R_N - G}{1 + \frac{1}{\beta}}. \quad (2.21)$$

2.3.1. Razão de Bowen: um comportamento indicativo do estado de hidratação da superfície.

A relação de Bowen representa a forma pela qual a maior parte da energia disponível na superfície se redistribui para a atmosfera. Assim, na razão de Bowen, um valor de H maior que de λE , indica que a maior parte dessa radiação foi dissipada na forma de calor sensível, resultando no aquecimento da superfície e do ar atmosférico.

Na equação do balanço de energia global, esse deslocamento do aproveitamento de R_N no sentido de H, indica que uma quantidade pequena de R_N foi convertida em calor latente λE estando a água na superfície, limitada até certo ponto. Se o contrário ocorre e λE é maior que H, o incremento de calor na atmosfera se dá na forma de calor latente. Esse incremento não chega propriamente a aumentar a temperatura atmosférica mas eleva o teor de umidade no ar, demonstrando a presença de um fluxo turbulento de vapor d'água, o que indica um maior estado de hidratação para a superfície na qual o balanço da radiação está se estabelecendo.

O comportamento figurado pela relação de Bowen é também importante no caso em que o solo está coberto de vegetação. Nessa situação, a relação entre H e λE representa a capacidade dessas plantas em armazenar água na zona das raízes, determinando a importância relativa dos fluxos de calor sensível e calor latente. Essa modulação da relação de Bowen representa ainda o efeito maior pelo qual os processos na superfície terrestre intervêm na dinâmica atmosférica e a partir daí, no clima (BAEZA, 1993).

2.4. Os balanços hídrico e de energia em função da evapotranspiração.

Uma outra forma de analisar esta relação intrínseca entre os balanços hídrico e de energia pode ser feita verificando a forma como a água presente no sistema solo-planta-atmosfera rege o comportamento dos diversos termos do balanço de energia. Assim, as radiações de ondas curtas e de ondas longas que atingem a superfície são função da quantidade de água na forma de vapor ou condensada (nuvens) que encontram em seu caminho. A quantidade de água presente na superfície também é indicada pelo seu albedo que, para o caso de uma superfície vegetada, é inversamente proporcional ao estado de hidratação das plantas (BAEZA, 1993). Assim, baixos coeficientes de reflexão podem indicar uma superfície bem suprida de água. O valor de emissividade, por sua vez, possui uma relação de proporção direta com a quantidade de água na superfície, sendo maior para superfícies úmidas que para superfícies secas (BAEZA, 1993).

Segundo REICHARDT (1985), o balanço de energia está intimamente relacionado à lei de conservação das massas que é representada pelo balanço hídrico. Este, por sua vez é necessário ao estudo dos processos que constituem o ciclo da água em uma cultura e que demandam energia para se desenvolverem. Esta afirmação é facilmente verificada quando se compara a equação 2.10 com a equação 2.22, de balanço hídrico:

$$B_H = P - E_P - P_{ER} - R_{OFF} \quad (2.22)$$

onde B_H é o valor resultante do balanço hídrico ou a quantidade de água disponível no solo; P representa a entrada de água no sistema por precipitação, sendo a saída, obtida pela somatória dos termos E_P , P_{ER} e R_{OFF} (do inglês, *run off*) que representam respectivamente a evapotranspiração potencial, o excesso de água percolada para a profundidade e o excesso drenado pela superfície (PESSOA, 1985). De acordo com JANUÁRIO (1992), esta última parcela da equação de balanço hídrico pode ser desprezada no caso de uma superfície considerada como horizontal.

O “fluxo de evaporação”, ou quantidade evapotranspirada de água (E_P), aparece tanto na equação de balanço hídrico quanto na de balanço de energia proporcionando um acoplamento direto e importante entre os balanços de calor e de umidade na superfície (BAEZA, 1993).

2.4.1. A aplicabilidade dos valores de evapotranspiração.

Grande parte do sucesso de um programa de irrigação depende da correta determinação, não apenas da quantidade de lâmina d'água a ser aplicada, mas principalmente de quando essa aplicação deve ser feita. Dessa forma, se procura evitar que os níveis críticos de teor de água no solo sejam atingidos. Esses níveis críticos indicam os limites de água armazenada no solo, até os quais não se observam os efeitos negativos provocados pelo déficit hídrico na produtividade das culturas (BERGAMASCHI, 1992).

Vários autores, dentre eles ISRAELSEN & HANSEN (1962), WITHERS & VIPOND (1977) e VIEIRA (1986), estabelecem, de uma maneira geral, que o nível crítico é atingido quando a umidade do solo é reduzida ao valor de 50% da sua capacidade de campo.

Esta generalização pode, todavia, levar a uma conclusão errônea a respeito das datas de irrigação. Tal afirmação se baseia no fato de que o valor de nível crítico é regido pela taxa de consumo de água pelas plantas que é função de uma série de fatores presentes no sistema solo-planta-atmosfera (BERGAMASCHI, 1992), cujas características variam para cada situação estabelecida.

Dentre estes fatores, podemos citar: a profundidade, salinidade, textura e estrutura dos solos; profundidade e densidade do sistema radicular, duração da fase vegetativa e também o teor de umidade do produto colhido além de outros ligados ao manejo das culturas (BERNARDO, 1987).

Entretanto, os fatores preponderantes são aqueles relacionados às variações climáticas que regem a demanda evaporativa da atmosfera (MATZENAUER, 1992). Muitos desses fatores, dentre eles a radiação solar, comprimento do dia, velocidade do vento, tensão de saturação do vapor d'água atmosférico e as temperaturas do ar e da superfície, são utilizados na parametrização dos modelos empregados nas estimativas da evapotranspiração potencial das culturas.

Diante do exposto é natural notar a aplicabilidade dos valores de evapotranspiração, determinados por medições diretas ou por estimativas, no planejamento das datas nas quais as lâminas d'água deverão ser aplicadas. Esse planejamento consiste basicamente em se determinar a quantidade de água disponível em função da zona radicular e dividi-la pelo consumo médio da cultura expresso em milímetros diários (ISRAELSEN & HANSEN, 1962; WITHERS & VIPOND, 1977; VIEIRA, 1986; BERNARDO, 1987). O resultado será o turno de rega ou intervalo de tempo em dias, a ser adotado entre duas operações sucessivas de irrigação, numa mesma posição.

2.4.2. Uma análise de métodos empregados na estimativa da evapotranspiração.

A evapotranspiração pode ser medida diretamente por métodos embasados na equação de balanço hídrico ou no princípio de conservação da energia. Esse tipo de medição demanda de instrumentação específica, de manejo especializado, sendo mais empregado em nível experimental. Além disso, as características físicas de tais instrumentos levam a medidas de evapotranspiração determinadas para intervalos de tempo muito curtos e em escalas de alcance local. Desse modo, as medidas diretas são mais utilizadas para aferição de métodos de estimativa em âmbito regional (FONTANA, 1992).

Existe uma grande diversidade de métodos de estimativa da evapotranspiração. Esses métodos, cuja maioria se baseia em formulações empíricas, trazem como vantagem, não só a aplicabilidade em escalas regionais, como já foi dito, mas também a versatilidade do emprego em regiões de características distintas. Esse último fato levou ao surgimento de variantes para tais métodos, visando simplificá-los e adaptá-los a situações específicas, como é o caso do método de Thornthwaite modificado por Camargo (PEREIRA, 1992). Tanto na modificação proposta por Camargo, como na sua versão original, para fins climatológicos, o método de Thornthwaite emprega dados meteorológicos em valores médios, normalmente em intervalos mensais. O mesmo ocorre com outros métodos empíricos como o de Blaney-Criddle, por exemplo, o que os torna de aplicação desvantajosa para estimativas feitas em escalas temporais menores que a mensal (VIANELLO & ALVES, 1991; BERNARDO, 1987).

O método para estimativa da evapotranspiração desenvolvido por Penman tem os termos do balanço de energia como base, relacionando o valor da razão de Bowen com o fluxo de vapor d'água na atmosfera ou taxa de evapotranspiração, portanto, com a quantidade de água disponível à superfície.

Assim, no método proposto por Penman, podem ser considerados dados médios diários para os elementos meteorológicos em questão, sendo esse, um aspecto vantajoso da equação de Penman em relação aos outros métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração citados acima.

Conforme observado na equação 2.9, a temperatura de superfície é um parâmetro meteorológico fortemente relacionado ao balanço energético de ondas longas e portanto à quantificação da radiação líquida disponível. Entretanto, por se tratar de um parâmetro de difícil medição, Penman procurou eliminá-lo da razão de Bowen, pois se propunha a estimar a evapotranspiração a partir de dados obtidos facilmente em estações meteorológicas. Para proceder a esta eliminação, Penman considerou que a evaporação ocorria em função do vento e do déficit de saturação do vapor d'água na atmosfera; observou que, no interior do abrigo termométrico, o poder evaporante do ar é condicionado por esses parâmetros e assim estabeleceu uma relação entre a evaporação no interior do abrigo e a evaporação na superfície do solo; relacionou a diferença entre a tensão de saturação medida no abrigo e a observada na superfície vegetada com a diferença entre as temperaturas da superfície e do ar, posto que a primeira diferença é resultante da segunda. Desse modo, Penman chegou ao coeficiente angular da reta tangente à curva de vapor d'água no ponto em que a temperatura de superfície se iguala à do ar; utilizou esse coeficiente na expressão de Bowen e obteve coeficientes de ajuste que são aplicados a cada um dos termos da expressão final de Penman para a evaporação de superfícies naturais (OMETTO, 1981).

O método de Penman também é conhecido como "método combinado de Penman" pois combina os termos energéticos do balanço de energia com um termo aerodinâmico que representa a capacidade evaporativa do ar. Este termo é dado pelo produto do déficit de saturação do ar com um coeficiente global de

transporte, representado por uma função empírica do vento e, dessa forma, denota as condições areodinâmicas da região (PEREIRA, 1992).

Um aspecto desvantajoso do método de Penman, também presente no método de Priestley - Taylor, seu derivado, é o fato de estimar a radiação líquida pela equação de Brunt. Essa expressão estima o balanço de radiação de ondas longas admitindo o equilíbrio térmico do sistema e assim assume o valor de T_s como igual à da temperatura média radiante do ar à sombra, medida em abrigo meteorológico. Segundo OMETTO (1981), embora essa aproximação possibilite utilizar dados normalmente obtidos em postos meteorológicos, representa uma fonte de erro na estimativa do balanço de ondas longas.

Embora a equação de Penman possa ser utilizada para estimativas feitas em escalas temporais menores que a mensal, a precisão do método para estimativas feitas em períodos menores que cinco dias depende, em grande parte, da exatidão com que é medida ou estimada a radiação líquida disponível (FONTANA, 1992) e, portanto, a temperatura de superfície no balanço de ondas longas.

2.5. O sensoriamento remoto orbital como ferramenta para a estimativa da temperatura de superfície.

Além dos métodos tradicionais empíricos de estimativa da evapotranspiração potencial, atualmente se dispõem de algoritmos de simulação de processos superficiais da Terra, desenvolvidos para uma série de escalas e em diferentes níveis de complexidade física (BASTIAANSEN, 1995). Entretanto, devido às variações, tanto espaciais quanto temporais, das interações entre o solo, a vegetação e a atmosfera, a evaporação regional em paisagens heterogêneas se torna difícil de prever por meio de estimativas ou de modelos computacionais. Nesse sentido, o sensoriamento remoto orbital contribui para o fornecimento de dados temporais e espaciais para um acompanhamento intensivo

dos processos que ocorrem na superfície terrestre. Entretanto, para o desenvolvimento de estudos relativos à temperatura de superfície é necessário ainda que o sensor escolhido conte com uma resolução espectral que o habilite à captação da radiação emitida pelos corpos terrestres. Essa emissão ocorre na forma de radiação eletromagnética de ondas longas.

2.6. Os fundamentos físicos do sensoriamento remoto orbital da radiação de ondas longas.

Diversos autores, dentre eles, CAMPBELL (1977), SILVA (1978), SLATER (1980), OMETTO (1981), SMITH (1983), GUYOT (1989), CRACKNELL & HAYES (1991), MIRALLES (1991) e BAEZA (1993) situam a radiação de ondas longas dentro do intervalo espectral que vai de 4,0 a 130,0 μm (Fig. 2.2), definindo essa extensão de comprimento de ondas como região infravermelho-distante do espectro de radiação eletromagnética.

Pela lei de Wien, o comprimento de onda de máxima intensidade da radiação emitida por um corpo negro varia inversamente em função de sua temperatura. A figura 2.3 ilustra este fenômeno, mostrando que quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda com emissão máxima. Esta observação explica o fato de a porção mais significativa da radiação solar (a 6000 K) estar compreendida no espectro de ondas curtas. O mesmo ocorre com a superfície terrestre que emite radiação em ondas longas, tendo a faixa que vai de 7 a 15 μm associada ao seu maior volume de radiação, emitido a uma temperatura próxima de 300 K. Objetos terrestres com temperatura superior ao zero absoluto vão emitir radiação eletromagnética num valor de comprimento de onda constituinte deste intervalo. Assim, apresentam uma resposta própria em termos de energia emitida, o que se conhece como sua assinatura espectral (GARCIA & CASELLES, 1991).

2.6.1. As perturbações atmosféricas

O fluxo energético emitido pela superfície tem as suas características modificadas por perturbações promovidas por componentes do meio atmosférico. Essas perturbações podem ocorrer simultaneamente de duas formas: pelo espalhamento e pela absorção da radiação (MIRALLES, 1991).

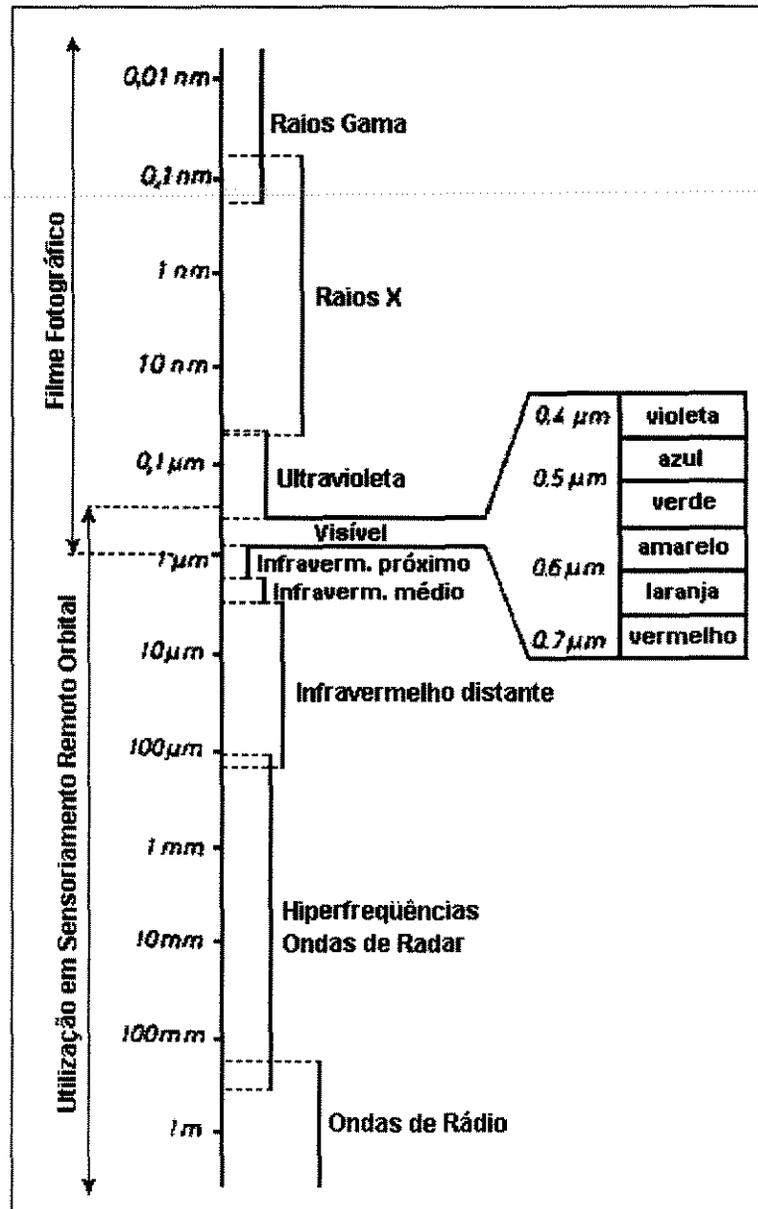


Figura 2.2. O espectro da radiação eletromagnética
Fonte: GUYOT (1989).

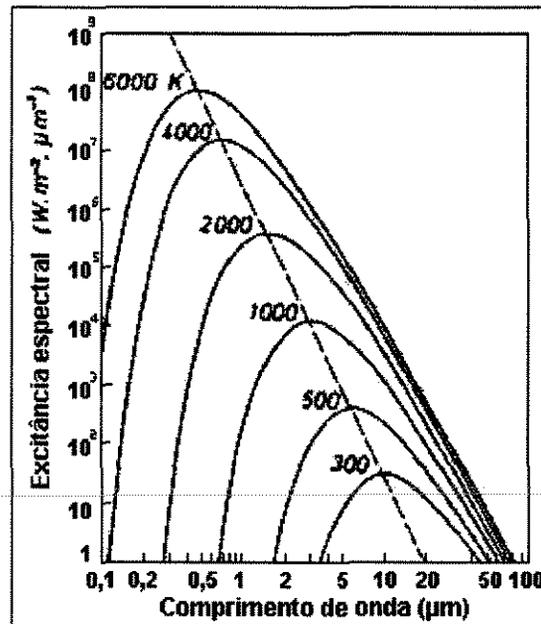


Figura 2.3. Variação da excitância espectral dos corpos negros em função da sua temperatura - Lei de Wien.

Na absorção, a radiação é “atenuada”, o que leva a uma diminuição na sua densidade de fluxo transmitido; o processo se estabelece por uma interação seletiva entre a energia emitida e as partículas atmosféricas, sendo essa seletividade em função do tamanho do corpo absorvedor e do comprimento de onda da radiação (SCHANDA, 1986; NOVO, 1992; LENOBLE, 1993). Essa interação é marcada por fenômenos de transição de níveis de energia, podendo a absorção se dar tanto por vibrações transacionais quanto por mecanismos rotacionais moleculares (SILVA, 1978)

Estes processos são responsáveis pela quantização da energia que, dessa forma, é reemitida sendo composta por fótons situados em níveis menos energéticos, o que caracteriza a “atenuação” da radiação incidente. Com essa cessão da energia eletromagnética, há produção de energia calorífica o que leva ao aquecimento do meio atmosférico (MIRALLES, 1991).

O processo de espalhamento, por sua vez, não altera a energia dos fótons. A energia é apenas refletida e refratada em todas as direções. A radiação é difundida por três diferentes processos, a saber: o espalhamento de Rayleigh, o de Mie e o não-seletivo. A distinção entre eles depende do comprimento de onda da radiação incidente e do diâmetro da partícula difusora (CRACKNELL & HAYES, 1991). Maiores detalhes sobre cada uma dessas formas de dispersão podem ser encontrados em CAMPBELL (1977), CHAHINE et al. (1983), SCHANDA (1986), CRACKNELL & HAYES (1991), MIRALLES (1991), e LENOBLE (1993).

As moléculas de Nitrogênio (N_2) e de Oxigênio (O_2) constituem juntas 99 % dos gases encontrados na atmosfera. Entretanto, não são moléculas radiativamente ativas nas regiões do visível ou do infravermelho do espectro. Dentre os gases atmosféricos, os que mais interagem com a radiação eletromagnética são o dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3) e o vapor d'água (MIRALLES, 1991). Este último, de concentração bastante variável, tanto espacial, quanto temporalmente.

A maior parte da radiação absorvida e emitida na região do infravermelho-distante é atribuída, em maior parte, ao vapor d'água e ao CO_2 . Esses dois gases, principalmente o vapor d'água, são importantes determinadores da quantidade de energia tanto na atmosfera, quanto ao nível da superfície terrestre. Isoladamente, o vapor d'água tem significativas bandas de absorção a $6,25\mu m$ e a partir de $20\mu m$, alcançando até as faixas de microondas; o CO_2 absorve fortemente a $4,3\mu m$ e $15\mu m$. O O_3 , por sua vez, é responsável pela absorção da radiação na região ultravioleta do espectro e, mais expressivamente, no infravermelho, entre $9,6\mu m$ e $14\mu m$.

A figura 2.4 sumariza o espectro de absorção dos mais importantes agentes de interferência atmosférica, possibilitando que se estabeleça uma

comparação entre os mesmos. O diagrama deixa claro que apenas uma larga região do espectro entre $8\mu\text{m}$ e $12\mu\text{m}$ permanece transparente; enquanto que abaixo de $4\mu\text{m}$ existem outras quatro bandas que podem ser utilizadas pelo sensoriamento remoto. Na mesma figura também é indicado que a atmosfera é opaca nas regiões do infravermelho-distante que vão além de $14\mu\text{m}$, aproximadamente.

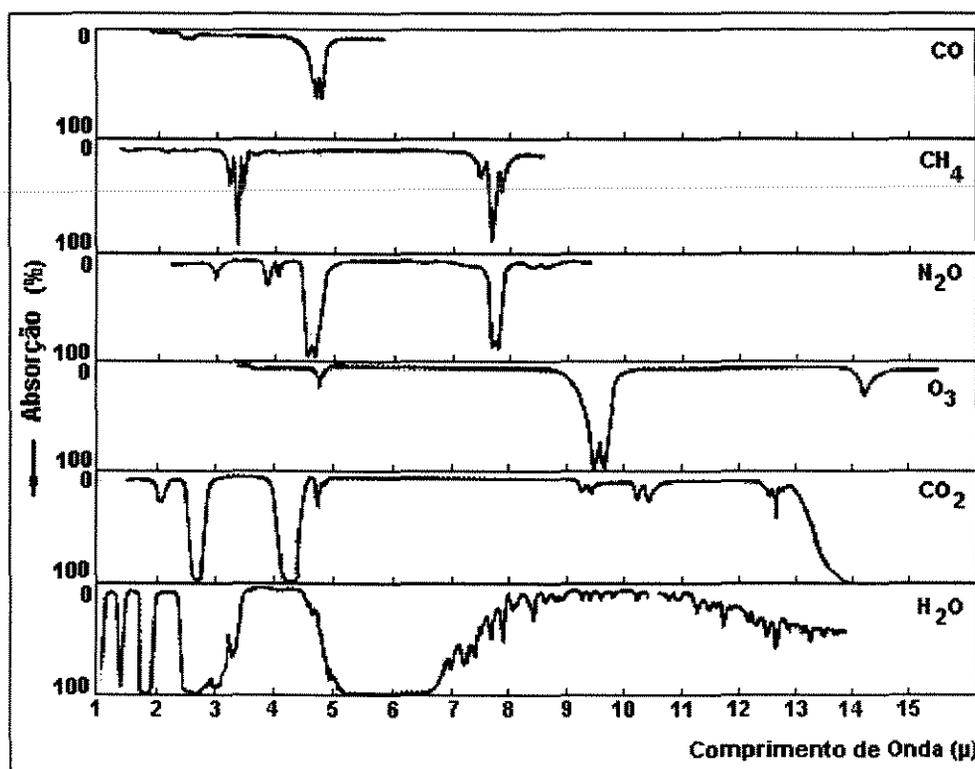


Figura 2.4. Espectros de absorção do CO, CH₄, N₂O, O₃, CO₂ e H₂O ao longo de um caminho vertical através da atmosfera.

2.6.1.1. As janelas espectrais.

A figura 2.5 permite uma melhor visualização, de uma maneira aproximada, de quanto cada um dos três principais agentes de interferência absorve do total de radiação emitida pela Terra e em quais comprimentos de onda do espectro estas absorções ocorrem. Assim é possível observar em quais comprimentos de onda o fenômeno de absorção é menor, dando uma idéia das bandas do espectro

que são de uso viável pelo sensoriamento remoto. Essas bandas constituem o que usualmente se denominam de janelas espectrais; levam esse nome por permitirem uma maior transmissão da energia emitida pela terra e que alcança o sensor.

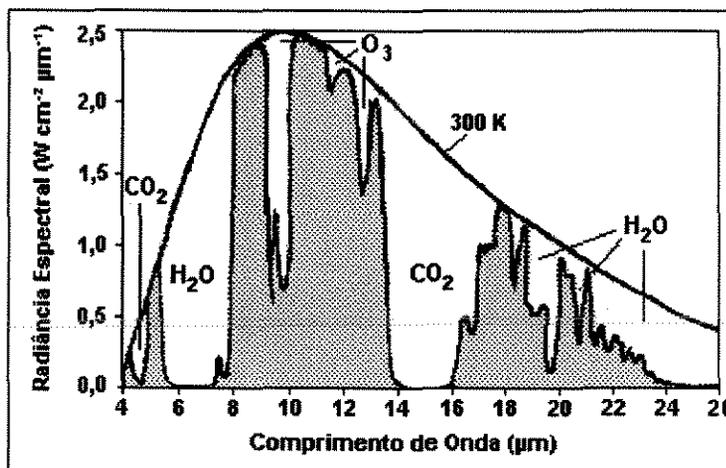


Figura 2.5. Curva da radiação emitida pela Terra em comparação com a curva de radiação emitida por um corpo negro a 300 K, posicionado no topo da camada atmosférica.

Fonte: adaptado de OMETTO (1981) e MIRALLES (1991).

MIRALLES (1991) lista algumas das janelas espectrais observadas para cada faixa do espectro, indicando que, para o infravermelho-distante, existem as janelas que se posicionam nos intervalos de 8 a 9,2 μm , 10,2 a 12,4 μm e 17,0 a 22,0 μm . Para comprimentos de onda superiores a 22 μm são produzidas transições rotacionais, principalmente de H₂O, que “fecham a janela” até a região das microondas.

O espectro emissivo da terra compreende a região que vai de 4 a 22 μm , estando o máximo da emitância espectral dentro do intervalo que vai de 7,0 a 15 μm . Por esse motivo, a janela espectral mais utilizada para fins de sensoriamento remoto orbital na região do infravermelho-distante é a que vai de 10,2 a 12,4 μm .

Os sensores AVHRR, a bordo dos satélites da série NOAA, contam com duas bandas de detecção da energia eletromagnética emitida na faixa do infravermelho-distante. Essas bandas compreendem as regiões que vão de 10,3 a 11,3 μm (canal 4) e 11,5 a 12,5 μm (canal 5) e que se encaixam na região do espectro compreendida pelas janelas espectrais. A figura 2.6 dá uma idéia da viabilidade do uso destas bandas do sensor AVHRR quanto a esse aspecto.

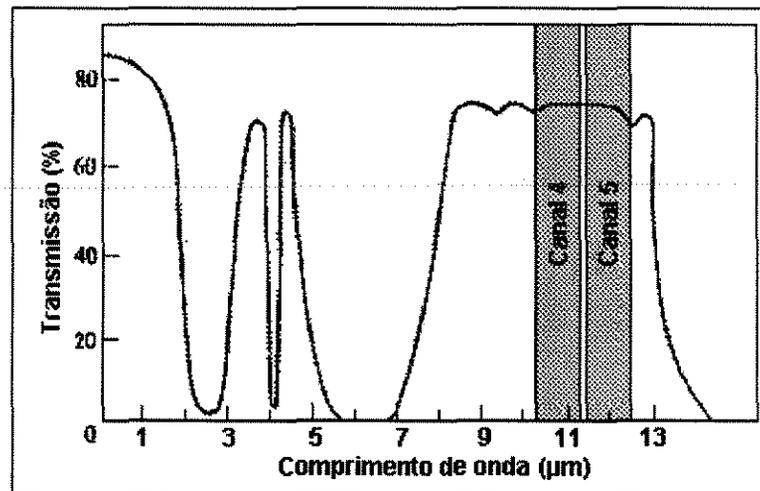


Figura 2.6. Bandas espectrais do sensor AVHRR superpostas ao espectro de transmissão da radiação emitida pela superfície terrestre.

Fonte: adaptado de SILVA (1978).

2.7. O Sistema NOAA/AVHRR

Os satélites da série NOAA foram projetados para operar numa órbita polar e heliosíncrona, para a qual o eixo maior tem 7.231,9 km, formando um campo de observação de pontos do globo compreendidos entre 78° de latitude Norte e 78° de latitude Sul (ASSAD, s/d). Segundo KIDWELL (1995), a órbita possui um ângulo de inclinação máximo de 98,9° e atinge uma altitude que vai de 845,67 km no seu perigeu a 861,62 km no seu apogeu. O período orbital, de aproximadamente 102 minutos, produz 14,1 órbitas por dia.

O horário solar local das passagens é essencialmente o mesmo para qualquer latitude. Entretanto, uma variação nesse horário é ocasionada pela derivação que a órbita do satélite vai sofrendo com o tempo (KIDWELL, 1995). A tabela 2.1 mostra o horário solar local aproximado dos cruzamentos equatoriais ascendente e descendente para algumas das plataformas da série. Nela, é possível comparar os horários das passagens em duas diferentes datas: na época de lançamento do satélite e em março de 1995.

Tabela 2.1. Comparação entre os horários de passagens dos satélites em duas datas diferentes.

Satélite	Horário do Cruz. Eq. Ascendente (h:min)		Horário do Cruz. Eq. Descendente (h:min)	
	no lançamento	em março / 95	no lançamento	em março / 95
NOAA -10	19:30	17:53	07:30	05:53
NOAA -11	13:30	17:23	01:30	05:23
NOAA -12	19:30	19:15	07:30	07:15
NOAA -14	13:30	13:30	01:30	01:30

Fonte: adaptado de KIDWELL (1995).

Cada uma das plataformas NOAA em órbita está programada para realizar duas passagens diárias (uma diurna e outra noturna) sobre um mesmo alvo terrestre, o que lhes garante uma alta frequência de aquisição de imagens. Esse fato aliado à resolução espectral do sensor AVHRR na região do infravermelho-distante e à baixa resolução espacial de seus produtos, torna as imagens oferecidas pelo sistema NOAA/AVHRR aptas à estimativa da temperatura de superfície dentro de curtos intervalos de tempo e em escalas regionais.

Tais características podem ser consideradas como vantagens desse sistema de imageamento, sobre o de outras séries orbitais, também utilizadas em sensoriamento remoto ambiental.

O sistema orbital completo inclui:

- a) o sondador TOVS, constituído por 3 instrumentos independentes que permitem a obtenção de perfis verticais de temperatura e vapor d'água (NING et al., 1987), a saber:
 - a.1) o HIRS/2, capacitado a medir a radiação incidente em 20 regiões do espectro;
 - a.2) a SSU que emprega uma técnica de absorção seletiva para tomar medidas em 3 canais. A unidade mede a radiação emitida pelo CO₂ no topo da atmosfera;
 - a.3) e a MSU que realiza medidas por 4 canais na região de 5,5mm, do oxigênio (ALLISON & SCHNAPF, 1983) e
- b) o sensor AVHRR oferecendo:
 - b.1) dados HRPT cuja gravação é feita do modo como são transmitidos pelo sensor em tempo real, digitalizados numa resolução radiométrica de 10 bit, portanto com 1024 níveis digitais;
 - b.2) dados LAC/HRPT que são gravados a bordo do satélite com resolução de 1 km², sendo transmitidos como dados HRTP também numa precisão de 10 bit e
 - b.3) os dados GAC, com resolução de 16 km², que são constituídos por uma média de 4 *pixels* de alta resolução consecutivos em linha, amostrados pelo processador a bordo do satélite a cada 3 linhas de varredura, tomadas a intervalos de uma coluna (KIDWELL, 1995).

Os dados produzidos pelo sensor AVHRR se notabilizam pelo baixo custo e facilidade operacional. Tais vantagens têm levado os usuários dos satélites NOAA a procurarem adquirir antenas de recepção e softwares de processamento de imagens que permitam a aquisição das imagens LAC e GAC, em tempo real (ASSAD, s/d).

Além dos canais 4 e 5 operando na região do infravermelho-distante do espectro eletromagnético, a resolução espectral de alguns dos sensores AVHRR é dada por mais outras três bandas, conforme listado na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Resolução espectral para cada um dos canais do sensor AVHRR a bordo do satélite NOAA-14.

Canais	Faixa espectral	Resolução (μm)
1	visível	0,58 a 0,68
2	infravermelho próximo	0,725 a 1,10
3	infravermelho médio	3,55 a 3,93
4	infravermelho distante 1	10,3 a 11,3
5	infravermelho distante 2	11,5 a 12,5

Fonte: adaptado de KIDWELL (1995).

O sensor AVHRR trabalha com um ângulo de varredura que vai de $+55,4^\circ$ a $-55,4^\circ$, cobrindo, no solo, uma faixa de aproximadamente 2700 km de largura. O seu IFOV, ou campo instantâneo de visada, alcança uma amplitude que vai de 1,39 a 1,51 mrad, o que leva a uma resolução no solo de 1,1 km ao nadir. Desse modo, as suas imagens contam com uma resolução de célula (ou *pixel*) de aproximadamente $1,2 \text{ km}^2$.

Estas são as características que garantem à imagem, uma baixa resolução espacial e, conseqüentemente, um considerável volume de dados, o que é bastante apreciável no desenvolvimento de trabalhos em escalas regionais (EHRLICH et al., 1994).

2.8. O processamento digital das imagens.

2.8.1. O geo-referenciamento.

Fatores como a baixa altitude de imageamento, grande ângulo de varredura e a movimentação do satélite em relação à Terra, levam a distorções na imagem, que dificultam a identificação das coordenadas geográficas terrestres representadas nas coordenadas da imagem (MEDEIROS et al., 1983; FIGUEIRÊDO, 1989; SEGARRA, 1991). Essa identificação é feita através do uso de processos de correção geométrica ou geo-referenciamento.

De acordo com Smith (1975), citado por MEDEIROS (1983), um programa de geo-referenciamento atua em cada *pixel* da imagem num processo analítico de determinação de parâmetros orbitais necessários para gerar uma transformação matemática entre o sistema de referência do satélite e o de coordenadas terrestres. Dessa forma, o programa realiza um processo que “navega” cada pixel da imagem produzindo novas informações que promoverão uma mudança nas posições dos *pixels* da imagem (SEGARRA, 1991), no sentido de corrigi-las. Esse procedimento descreve a técnica de geo-referenciamento por “transformação baseada no modelo de geometria orbital”.

Já estão desenvolvidos programas de navegação, que garantem um alto grau de confiabilidade para as correções geométricas de imagens, viabilizando o seu uso. Alguns programas de processamento digital de imagem, já incluem em seus pacotes, algoritmos específicos para que se proceda ao geo-referenciamento, como é o caso do METPRO[®], comercializado pela GSC. Esse programa geo-referencia as imagens pela técnica de transformação das coordenadas da imagem, baseada em “pontos de controle no terreno” ou “marcas terrestres”, de coordenadas conhecidas. Essas “marcas terrestres” devem, portanto, ser visíveis na imagem e definidas pelo usuário (GSC, 1994).

2.8.2. A obtenção do valor de temperatura de superfície.

Os valores de níveis digitais da imagem produzida pelos canais 4 e 5 do sensor AVHRR são convertidos em valores de radiância, através de um processo de calibração. Os coeficientes de "Ganho" e de "Intercepto" para cada canal, utilizados nesse processo, vêm incluídos na base de dados gravada no formato "nível-1b", veiculada em cada imagem. Esses coeficientes permitem o desenvolvimento de uma calibração linear para os dados coletados e, desse modo, obtém-se um valor também linear para a radiância (R_{lin}) medida pelo sensor, conforme a equação:

$$R_{lin} = G \cdot C + I \quad (2.23)$$

onde G representa o coeficiente de Ganho, I é o coeficiente de Intercepto e C é o número de níveis digitais do pixel em operação que, para uma imagem de 10 bit, situa-se no intervalo que vai de 0 a 1023 (KIDWELL, 1995).

Uma segunda equação é utilizada para que se chegue a um valor corrigido de radiância (RAD), função apenas da radiação linear dada pela equação 2.23:

$$RAD = A_i \cdot R_{lin} + B_i \cdot R_{lin}^2 + C_i \quad (2.24)$$

na qual A_i , B_i e C_i são coeficientes de correção específicos para cada um dos canais infravermelhos do sensor (Anexo 2). Uma vez determinados os valores de RAD para os canais 4 e 5, a temperatura é calculada para cada um destes canais, usando a equação inversa da radiação de Planck (COLL et al., 1991; KIDWELL, 1995) :

$$T(RAD) = \frac{C_2 \cdot v}{\ln\left(1 + \frac{C_1 \cdot v^3}{RAD}\right)} \quad (2.25)$$

onde C_1 e C_2 são constantes, T é a temperatura (K) e ν é o número central do comprimento de onda (cm^{-1}) captada dentro da resolução espectral do canal em estudo. Entretanto, o valor de temperatura encontrado conta com um erro de leitura radiométrica provocado pelos efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos, já discutidos. Esses erros ocorrem pois, mesmo nas regiões de janelas espectrais é verificado um percentual de perturbação atmosférica na radiação transmitida (fig. 2.6), não devendo esse percentual ser desconsiderado.

Além disso, a transformação das radiâncias medidas pelo satélite em temperatura pela equação inversa de Planck é feita supondo que a superfície observada é um corpo negro, cujo valor de emissividade é igual a 1 (SOBRINO et al., 1991). Todavia, uma superfície vegetada não se comporta como um corpo negro perfeito, possuindo valores de emissividade sensivelmente menores que a unidade. Isso faz com que os valores de temperatura fornecidos pelo sensor sejam comprometidos também pelo efeito devido à emissividade, que leva a uma subestimação do valor de temperatura de superfície dado pela equação 2.25 (SOBRINO et al., 1993). Assim o valor de temperatura até aqui obito, passa a ser chamado de "temperatura aparente" da superfície (SOBRINO et al., 1993) e só pode ser considerado como representativo da realidade terrestre, depois de corrigido quanto aos efeitos atmosféricos e de emissividade da superfície.

2.8.3. A correção das imagens devido aos efeitos atmosféricos e de emissividade: o método *split window*.

OTTLÉ & VIDAL-MADJAR (1992) testaram diferentes algoritmos de correção do efeito atmosférico em dados AVHRR e TOVS, além de compará-los entre si. Os resultados mostraram a superioridade do método denominado *split window*. Este método foi idealizado sobre a base teórica de que a atenuação atmosférica da radiância terrestre é proporcional à diferença entre as medidas de radiância realizadas em dois diferentes canais, situados dentro da faixa espectral que vai de 8 a 14 μm .

Desse modo, assume uma absorção diferencial, em função do comprimento de onda, para cada um dos canais infravermelho-distantes do sensor AVHRR. Devido a esse princípio é classificado como um método bi-canal de correção atmosférica. O método também considera as modificações sofridas pela radiação emitida, que ocorrem em função da emissividade da superfície. Este parâmetro assume um valor diferenciado para cada comprimento de onda, apresentando um efeito distinto para cada um dos canais, que também é corrigido pelo método (COLL et al., 1991).

Segundo SOBRINO et al. (1993), a grande vantagem do método *split window* é a sua simplicidade, considerando que o seu algoritmo é representado por uma equação linear.

Derivada da equação de transferência radiativa (COLL et al. 1991), a equação final de *split window* é então escrita como uma combinação linear das temperaturas aparentes T_4 e T_5 obtidas, respectivamente, a partir dos canais 4 e 5 do sensor, assumindo a sua forma típica (SOBRINO et al., 1993):

$$T_{split\ window} = T_4 + A (T_4 - T_5) + B \quad (2.26)$$

com

$$A = a_0 + a_1 (1 - \varepsilon_4) + a_2 \Delta\varepsilon, \quad (2.27)$$

$$B = T_4 \left[\frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4} (b_{04} + b_{14} \Delta\varepsilon) - \frac{1 - \varepsilon_5}{\varepsilon_5} (b_{05} + b_{15} \Delta\varepsilon) \right], \text{ e} \quad (2.28)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5. \quad (2.29)$$

Na equação 2.26, $T_{split\ window}$ representa a temperatura de superfície já no seu valor corrigido devidos aos efeitos de atenuação atmosférica e de emissividade; o coeficiente A representa a absorção atmosférica, sendo pequena a sua dependência devida à emissividade; B, por sua vez, é fortemente dependente da emissividade da superfície (SOBRINO et al. 1993), sendo um coeficiente corretor tanto do efeito provocado por ela, quanto daqueles causados por gases atmosféricos distintos do vapor d'água, principalmente o dióxido de carbono.

Os termos a_0 , a_1 , a_2 , b_{04} , b_{14} , b_{05} , b_{15} , descrevem parâmetros relativos às características da atmosfera existente entre a superfície e o sensor. Os valores destes termos, apresentados na tabela 6.2 (Anexo 2), foram determinados para quatro modelos atmosféricos, permitindo que se obtenha os coeficientes A e B da equação 2.26 para um elevado número de situações climáticas e geofísicas (COLL et al. 1991). Os termos ε_4 e ε_5 representam os valores de emissividade da superfície, observados nos canais 4 e 5, respectivamente.

A equação de *split window* já foi utilizada amplamente na medida da temperatura de superfície do mar (SST) e com muito bons resultados, como os obtidos por FRANCA & CRACKNELL (s/d) e por COLL et al. (1993). Esse autor utilizou o método na correção atmosférica de dados NOAA-AVHRR, usados para a determinação da SST em latitudes médias, chegando a uma precisão de 0,5 K para os valores encontrados.

Entretanto, o *split window* também vem sendo largamente empregado na determinação da temperatura de superfícies naturais, que não a do mar, apresentando resultados igualmente de boa qualidade. Um bom exemplo deste tipo de aplicação do método, é o trabalho de RAMOS et al. (1994), no qual usando dados NOAA/AVHRR, estimaram a temperatura de superfície para campos de cevada e milho, em região semi-árida espanhola. Utilizando estas

estimativas, chegaram ao desenvolvimento de mapas de evapotranspiração, para a área de estudo. Os autores sugerem a possibilidade do uso deste resultado em programas de monitoramento de irrigação e em estimativas de produtividade para aquela região. Visando a obtenção de um mapa de temperatura para pomares de laranja, SOBRINO & CASELLES (1991), também, empregaram o método *split window*, obtendo resultados satisfatórios para a correção dos efeitos atmosféricos.

*“Quando eu me encontrava preso
Na cela de uma cadeia
Foi que vi pela primeira vez
As tais fotografias...”*

*Caetano Veloso
Terra.*

CAPÍTULO 3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. As características do local.

As medidas de campo foram coletadas em área de Latossolo Roxo, pertencente à Cooperativa Holambra, situada a 23°30'24" de latitude Sul e 48°55'14" de longitude Oeste, no Distrito de Holambra II, pertencente ao Município de Paranapanema, Estado de São Paulo (figuras 3.1. e 3.2), durante os meses de junho a agosto do ano de 1995. Os dados médios de precipitação e temperatura observados para a região são de 118,25 mm e 21°C, respectivamente.

3.1.1. A área de trabalho.

Dentro do campo já cultivado, foi selecionada uma área de 1 km² (1“*pixel* terrestre”), de topografia plana, com uma bordadura de aproximadamente 0,5 km (fig. 3.2). No interior desta área, definiu-se um local considerado como representativo de todo o *pixel* de estudo. Este local foi chamado de “Parcela Única”.

3.2. A cultura e a sua condução.

A espécie usada no plantio foi o trigo (*Triticum aestivum* L.) variedade IAC-24.

O plantio foi mecanizado, tendo sido concluído no período de uma semana, contado a partir de 15 de abril de 1995. A densidade utilizada foi de 70 sementes por metro, com espaçamento de 20 cm entre linhas.

De 1º a 10 de abril de 1995, foi feita uma aplicação de 5 toneladas de calcário por hectare. Posteriormente, no período de 10 a 15 de abril de 1995, este material foi incorporado ao solo em uma profundidade média de 25 cm.

Logo após o plantio, foi feita uma adubação de cobertura com o fertilizante NPK 08-28-16, irrigando-se a área em seguida. Neste procedimento, utilizou-se um sistema de irrigação por pivô central que se encontra instalado na área de estudo. O mesmo sistema foi utilizado nas irrigações subseqüentes, até época próxima da colheita.

3.3. A programação das visitas ao campo e a seleção das passagens do satélite.

Cada ida ao campo para coletas de dados foi condicionada por um conjunto de características referentes às órbitas dos satélites. Essas características deveriam ser tais que proporcionassem a obtenção de imagens minimamente afetadas pelos efeitos de distorção geométrica, causados por grandes ângulos de visada. Assim, a seleção das passagens foi feita seguindo basicamente os seguintes critérios:

a) a passagem, fosse ela ascendente ou descendente, deveria ter o seu centro posicionado a oeste da estação terrestre de recepção de imagens NOAA situada a 22°49'22" de latitude Sul e 47°03'59" de longitude Oeste, no Cepagri/Unicamp, localizado no Distrito de Barão Geraldo, Município de Campinas, Estado de São Paulo (fig.3.1.);

b) a antena, parte integrante da estação terrestre, marca Telonics[®], modelo THRPT-6 tiris[™] série HRPT *Earth Stations*, deveria captar as imagens estando posicionada num ângulo de elevação mínimo de 60° em relação ao maior eixo da passagem do satélite.

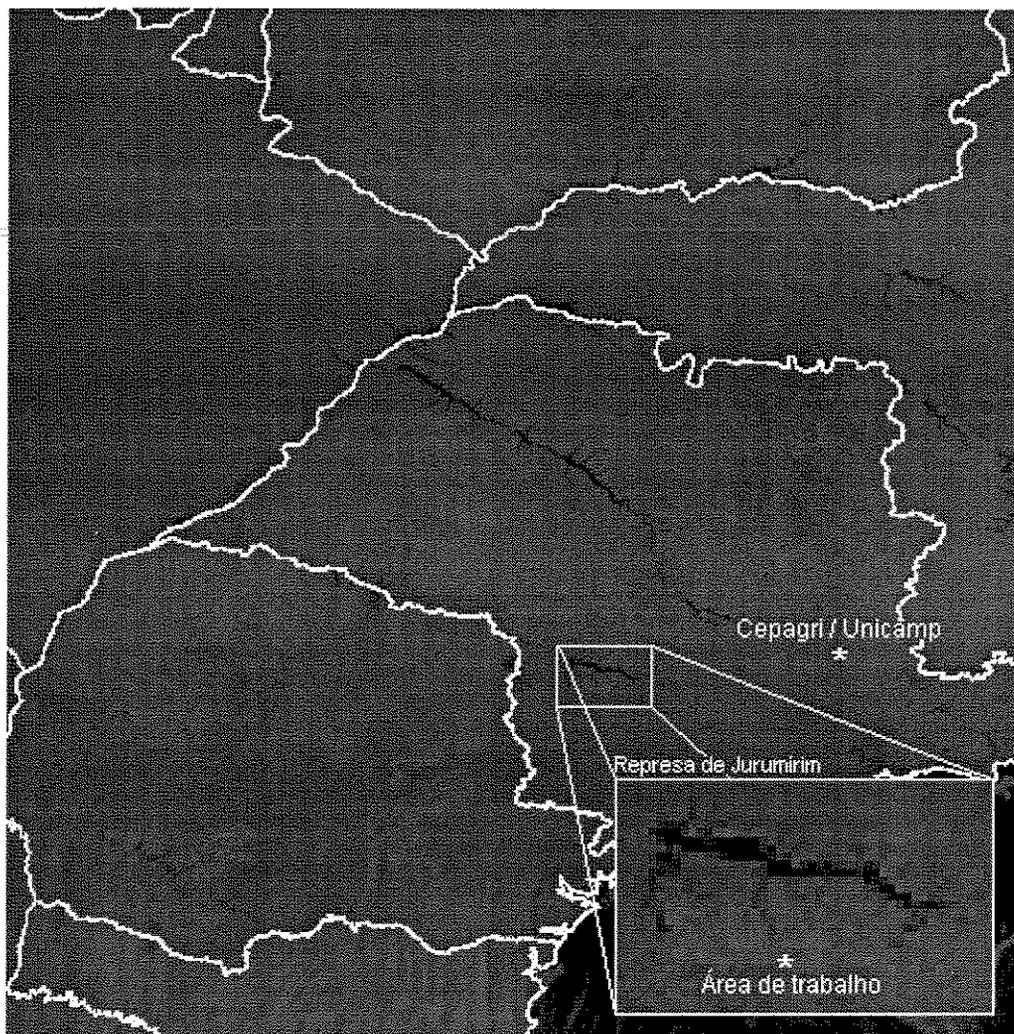


Figura 3.1. Estação terrestre de recepção de imagens (Cepagri/Unicamp - Campinas - SP) e Área de trabalho (Cooperativa Holambra II - Paranapanema - SP) representadas em imagem NOAA-14/AVHRR-LAC/HRPT, setorizada para o Estado de São Paulo, canal 2 - infravermelho próximo, feita em 14 de agosto de 1995, às 14:09 hs (horário local).

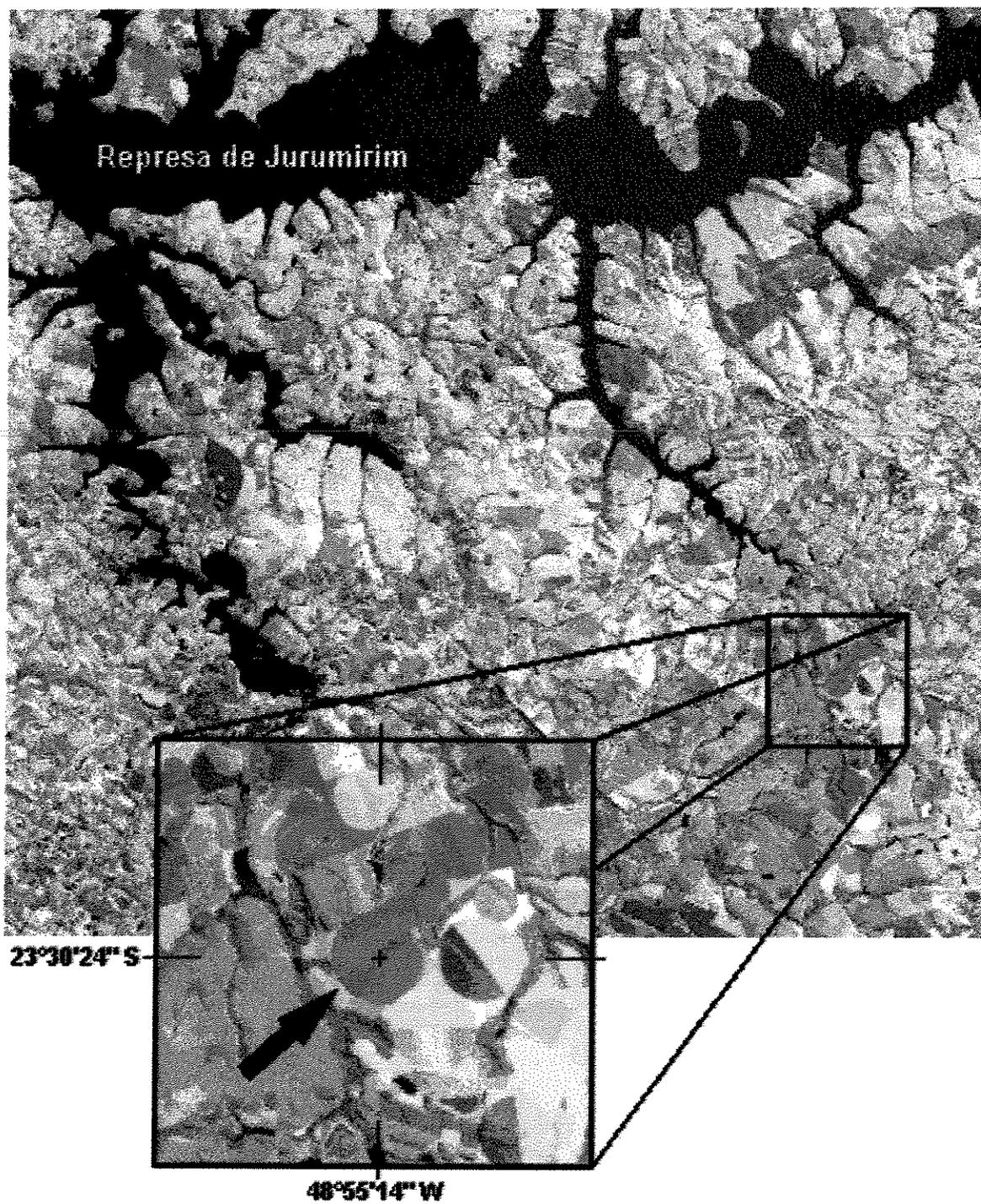


Figura 3.2. Represa de Jurumirim e área de trabalho (detalhe) em imagem Landsat TM 4-5-3 RGB, do dia 13 de agosto de 1995.

Uma vez identificadas as datas e horários em que ocorriam passagens que reunissem tais características, a visita ao campo passava a ser condicionada à obtenção de imagens livres de contaminação por nuvens, o que dependia de boas condições de tempo local, com dias e noites de céu desencoberto. Assim, as viagens ao campo eram confirmadas mediante previsão do tempo feita no próprio Cepagri/Unicamp, na véspera de cada data programada anteriormente conforme descrito no item "a". Desse modo, durante todo o tempo em que a cultura esteve no campo, foram selecionadas 8 passagens do satélite NOAA-14, cujas características orbitais são apresentadas na tabela 3.1. Todas as passagens tiveram o seu eixo maior posicionado a oeste da estação terrestre de recepção.

Tabela 3.1. Passagens selecionadas do satélite NOAA-14, captadas pela estação terrestre de recepção situada no Cepagri/Unicamp.

Data	Horário (GMT)	Sentido	Ângulo de elevação
1º de junho	04:33	descendente	88,1°
	17:02	ascendente	81,5°
28 de junho	04:40	descendente	70,2°
	17:12	ascendente	64,7°
26 de julho	04:41	descendente	72,7°
	17:12	ascendente	66,7°
14 de agosto	04:36	descendente	81,2°
	17:09	ascendente	74,6°

3.4. A condução das medidas de campo e o equipamento utilizado.

As medições se iniciaram em 1º de junho de 1995, quando as plantas já se encontravam no final do perfilhamento e início da fase de alongamento que ocorre aproximadamente de 30 a 50 dias após a semeadura (SOBRINHO & SOUZA, 1983).

3.4.1. As medidas de temperatura de superfície.

Para a tomada das temperaturas de superfície, foi utilizado um termômetro de radiação infravermelha, marca PYROVAR-USATHERM, modelo HPR-50, fabricado pela VEB MESSGERATEWER capacitado a realizar medidas de temperatura, num intervalo contínuo que inclui os registros mínimo de -20°C e máximo de 200°C , com precisão de aproximadamente $0,1\text{ K}$. Este instrumento opera na faixa espectral de $8,0$ a $35,0\mu\text{m}$, que engloba os comprimentos de onda da radiação captada pelos canais infravermelho distante do sensor AVHRR.

As medidas de temperatura de superfície foram feitas na "Parcela Única". O termômetro de radiação infravermelha foi posicionado sobre um ponto marcado por um piquete de madeira de aproximadamente 20 cm de altura, fixado no solo. O posicionamento do instrumento sobre o piquete foi feito com o auxílio de um tripé de suporte, com altura regulada de modo que o sensor do aparelho permanecesse $1,0\text{ m}$ acima do topo da cobertura vegetal.

Após o seu nivelamento, o aparelho foi apontado para topo da folhagem das plantas, a um ângulo de 30° em relação à vertical (Fig. 3.3). Procurou-se, dessa forma, evitar a interferência da radiação vinda da estrutura metálica do tripé e do operador do termômetro.

Foram coletadas três medidas de temperatura de superfície para cada passagem do satélite. A primeira delas, a dez minutos antes do horário previsto para a passagem, a segunda, no horário previsto para a passagem e a terceira, dez minutos após a segunda medição. Cada uma das tomadas de temperatura foi feita em três repetições: a primeira repetição orientada para o leste; a segunda, em 30° à direita da primeira repetição; e a última, em 30° à esquerda também da primeira repetição. Desse modo, para cada passagem do satélite, foi obtido um total de 9 repetições para a temperatura de superfície medida *in situ*.

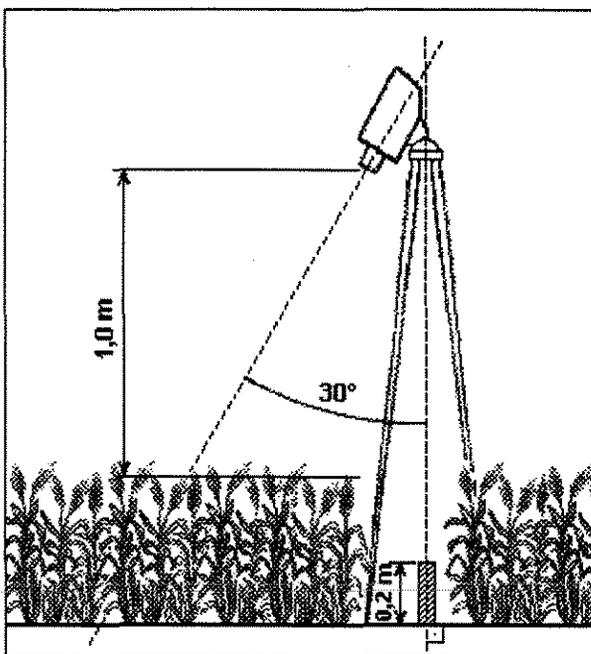


Figura 3.3. Representação esquemática da instalação do termômetro de radiação infravermelha no campo cultivado.

A emissividade da superfície cuja temperatura foi medida utilizando o termômetro de radiação infravermelha, deve ser ajustada no instrumento antes de se iniciar as medições de temperatura de superfície. HUBAND & MONTEITH (1986) mediram a emissividade aparente de uma superfície vegetada de trigo, em três fases de desenvolvimento da cultura. Citando e seguindo a metodologia delineada por Fuchs & Tanner (1966), os autores obtiveram como resultado um valor médio de emissividade igual a 0,98. Este valor foi utilizado no ajuste do valor de emissividade, para que se procedesse às medidas de temperatura de superfície no campo.

3.4.2. As medidas de velocidade do vento, psicrométricas e de temperatura da folha.

Considerando que as medidas de temperatura de superfície são influenciadas por variações na velocidade do vento e na umidade absoluta do ar, estes parâmetros foram medidos. Para tanto utilizaram-se, respectivamente, um

anemômetro de paletas e um psicrômetro de aspiração, ambos fabricados pela RÖSSEL MESSTECHNIK.

A velocidade do vento foi medida em metros por minuto, em três repetições feitas posicionando o instrumento a uma altura de 2 m do solo, dentro da "Parcela Única". Essas medidas foram feitas dentro dos intervalos de 10 minutos existentes entre cada medida de temperatura de superfície no campo, para uma mesma passagem.

No horário de cada passagem, as medidas de temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido em graus centígrados, foram tomadas uma única vez. Foi utilizado o psicrômetro de aspiração que fornece medições com uma precisão de 0,2 °C, posicionando-o na altura do topo da vegetação.

A temperatura da folha foi medida em contato direto com a planta e em três repetições. Para tanto foi utilizado o termopar instalado em um porômetro de equilíbrio dinâmico, marca LI-COR®, modelo LI-1600. Essas medidas foram feitas também dentro dos intervalos de 10 minutos existentes entre cada medida de temperatura de superfície no campo, para cada passagem do satélite.

3.5. As medidas termográficas, higrográficas e pluviométricas

Registros de temperatura e de umidade relativa do ar foram feitos diariamente, desde o início da condução dos trabalhos de campo. Para tanto foi instalado, em local próximo à área experimental, um abrigo meteorológico contendo um termógrafo e um higrógrafo, ambos da marca FISCHEN. Os dados pluviométricos foram coletados por um pluviômetro tipo "VILLE DE PARIS", também instalado desde o início da condução dos trabalhos de campo e em local próximo ao abrigo meteorológico.

3.6. O processamento das imagens

Em cada uma das passagens selecionadas, o sensor AVHRR gerou uma imagem LAC/HRPT. Essas imagens foram transferidas da estação de recepção para um disco rígido conectado a uma estação de trabalho marca *Silicon Graphics*[®]. O programa METPRO[®] instalado nessa estação de trabalho foi utilizado no processamento digital das imagens.

Inicialmente procedeu-se à definição de um setor de trabalho a ser aplicado em todas as imagens. O setor de trabalho é um arquivo de imagem que contém apenas uma parte dos dados brutos gerados pelo sensor. Ele pode ser utilizado quando a área a ser estudada se restringe a uma porção específica da imagem. Para cada imagem disponível, foi aplicado um setor que abrange todo o Estado de São Paulo (fig. 3.1). Após a setorização, as imagens foram observadas uma a uma.

Das oito imagens observadas, duas foram descartadas por apresentarem contaminação por nuvens. As imagens descartadas foram as feitas no dias 1º de junho e 26 de julho, nos respectivos horários locais de 14:02 h e 1:41 h.

3.6.1. O geo-referenciamento das imagens.

As seis imagens restantes foram geo-referenciadas usando a sub-rotina para o ajuste de navegação oferecida pelo METPRO[®]. O programa faz a correção geométrica baseando-se nas posições de marcas terrestres visíveis na imagem e definidas pelo usuário. Assim, o ajuste é feito pela diminuição da diferença de quadrados mínimos existente entre a posição (X, Y) de um determinado *pixel* da imagem e as coordenadas geográficas da marca terrestre representada por aquele *pixel*, fornecidas pelo usuário. À medida em que essas coordenadas são

registradas, o programa vai criando um arquivo de marcas terrestres que são utilizadas na operação de ajuste (GSC, 1994).

O programa requer que um número mínimo de 3 marcas terrestres sejam registradas. Entretanto, considerando a natureza da operação matemática usada, é sabido que o resultado será tanto melhor quanto maior for o número de marcas terrestres corretamente registradas. Melhores soluções podem ser obtidas para uma área de especial interesse na imagem, quando um número maior de marcas terrestres é concentrado em torno dessa área.

A represa de Jurumirim (fig. 3.1) foi usada como referência na localização das marcas terrestres por se encontrar muito próxima da área de trabalho e também por ser facilmente identificada em todas as imagens. Assim, utilizando a banda visível da imagem diurna feita no dia 28 de junho, foram escolhidas nove marcas terrestres, todas pertencentes à represa. Foram selecionadas outras dezoito marcas terrestres distribuídas em pequenos grupos, pela imagem setorizada. Procurou-se distribuir esses grupos o mais distante possível um dos outros de modo a se obter uma melhor cobertura possível de marcas terrestres espalhadas pelo setor.

As nove marcas terrestres pertencentes à represa foram identificadas em cartas topográficas elaboradas em escala 1:50.000. Estas cartas foram editadas nos anos de 1973 e 1974 pela Superintendência de Cartografia do IBGE. Foram utilizadas as folhas SF-22-Z-D-I-2 de Cerqueira César, SF-22-Z-D-I-4 de Itaí, SF-22-Z-D-II-3 de Jurumirim e a folha SF-22-Z-D-II-4 de Paranapanema.

As dezoito marcas terrestres restantes foram identificadas em cartas feitas em escala 1:250.000 editadas entre os anos de 1979 e 1983, também pela Superintendência de Cartografia do IBGE. Foram utilizadas as folhas SF-22-V-B de Andradina, SF-22-V-D de Dracena, SF-22-X-B de São José do Rio Preto,

SF-22-X-D de Araraquara, SF-23-V-A de Franca e a folha SG-22-X-D/SG-23-V-C MIR-514/515 de Curitiba.

Para cada marca terrestre identificada na carta topográfica correspondente foi lida a sua posição geográfica descrita pelo sistema plano de projeção UTM. Os valores dos pares de coordenadas terrestres UTM de cada marca terrestre foram convertidos em valores de latitude e longitude conforme requerido pelo programa METPRO[®]. Essas conversões foram feitas usando-se a função "PROJECT" do programa IDRISI[®] for Windows versão 1.0, comercializado pela Clark Univesity, Graduate School of Geography, EUA.

Foi criado um arquivo de marcas terrestres para cada imagem. Em todos esses arquivos foram usadas as mesmas marcas terrestres escolhidas para a imagem do dia 28 de junho. Para cada imagem, foram testadas várias combinações de marcas terrestres. As soluções apresentadas pelas combinações foram comparadas entre si e uma análise visual do erro, contabilizado em número de *pixels*, levou à seleção de combinações nas quais algumas das marcas terrestres registradas foram desconsideradas.

Após o geo-referenciamento, identificou-se o pixel de trabalho em cada uma das imagens feitas pelos canais 4 e 5 do sensor. O valor do nível de cinza de cada um desses *pixels* foi anotado. Considerando que as soluções de navegação obtidas não apresentavam erros maiores que três *pixels* em qualquer direção, os valores de nível de cinza de 48 *pixels* em torno do *pixel* de trabalho também foram anotados. Dessa foram obteve-se, para cada imagem, uma matriz 7x7 de valores de nível de cinza, na qual o valor central era representado pelo valor do nível de cinza do *pixel* de trabalho (figuras 3.4 a 3.9). Os valores de cada matriz foram submetidos a uma análise estatística, para a verificação da variabilidade desses dados.

1º de junho de 1995/ 4h33/ Canal 4/ 10-bit						
436	440	440	440	436	440	440
440	440	440	444	444	444	440
452	448	452	452	452	452	452
460	460	456	460	456	456	452
456	464	460	460	460	452	448
460	456	452	456	456	448	448
464	456	456	456	456	452	452
1º de junho de 1995/ 4h33/ Canal 5/ 10-bit						
416	420	420	416	416	420	420
420	420	420	420	420	420	420
428	428	424	424	428	428	428
432	436	432	432	432	428	428
432	436	436	432	432	428	424
432	432	428	428	428	424	424
436	432	432	432	432	428	428

Figura 3.4. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 4h40/ Canal 4/ 10-bit						
412	416	412	412	408	412	412
412	412	412	416	416	412	412
408	408	404	408	412	412	408
412	408	408	412	408	412	416
412	412	412	412	408	408	412
408	412	412	408	404	404	408
412	408	404	408	408	404	408
28 de junho de 1995/ 4h40/ Canal 5/ 10-bit						
384	388	388	384	384	384	388
384	384	384	388	388	388	384
384	384	380	384	384	388	384
388	384	384	384	384	384	388
384	388	388	388	384	384	388
384	388	388	384	380	384	384
384	384	380	380	384	380	384

Figura 3.5. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 17h12/ Canal 4/ 10-bit						
300	304	304	308	308	300	296
296	304	308	316	308	304	304
304	308	312	312	308	312	312
308	312	312	320	320	320	308
308	308	316	324	316	316	312
308	312	312	316	320	324	316
308	304	304	304	308	312	308

28 de junho de 1995/17h12/ Canal 5/ 10-bit						
304	308	308	312	312	304	304
304	308	312	316	312	308	308
308	312	316	316	312	312	312
312	312	316	320	320	320	312
312	312	316	320	316	316	316
312	316	316	320	320	320	316
312	312	312	308	312	316	312

Figura 3.6. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

26 de julho de 1995/ 17h12/ Canal 4/ 10-bit						
276	268	280	288	296	284	280
272	272	284	296	292	276	284
276	288	292	288	288	288	300
276	284	288	288	288	264	276
284	288	288	284	284	276	272
284	280	280	268	256	256	268
276	272	280	260	252	264	260

26 de julho de 1995/ 17h12/ Canal 5/ 10-bit						
276	272	280	284	292	284	280
272	276	284	292	288	280	284
276	284	288	284	284	288	292
276	284	284	284	284	272	276
280	284	288	284	284	276	272
284	280	280	272	264	260	268
276	272	280	264	264	268	264

Figura 3.7. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.

14 de agosto de 1995/ 4h36 /Canal 4 /10-bit						
428	428	428	428	428	428	428
424	424	424	428	428	424	424
416	416	420	424	428	432	424
428	424	424	420	424	432	432
428	428	428	424	420	424	428
420	416	416	416	412	420	424
416	416	416	416	412	416	416

14 de agosto de 1995/ 4h36 /Canal 5 /10-bit						
400	400	400	400	396	400	400
396	396	396	400	400	396	396
392	392	392	396	400	400	396
396	396	396	396	396	400	400
400	396	396	396	392	396	396
392	388	392	388	388	392	392
388	388	392	392	388	388	392

Figura 3.8. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

14 de agosto de 1995/ 17h09 /Canal 4 /10-bit						
232	224	224	224	236	236	232
228	228	224	228	232	220	228
232	236	236	240	236	224	240
224	236	240	232	240	220	208
232	240	244	228	212	204	208
228	236	236	216	212	208	204
212	200	212	196	200	208	204

14 de agosto de 1995/ 17h09 /Canal 5 /10-bit						
232	224	224	224	232	232	232
228	228	224	228	228	220	224
228	232	236	236	232	224	236
224	232	236	232	236	220	212
228	236	236	228	216	208	212
228	232	232	216	216	212	208
212	208	212	204	204	208	208

Figura 3.9. Matrizes 7x7 de valores de nível de cinza em resolução radiométrica de 10-bit, para a imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

3.6.2. Os cálculos para o valor de temperatura de superfície.

Os valores de nível de cinza dos *pixels* correspondentes à área de trabalho foram usados na equação linear (2.23) de calibração, que fornece um valor de radiância medida pelo sensor. A equação 2.24 foi usada para corrigir cada valor de radiância assim encontrado, fornecendo os valores de radiância corrigida (RAD).

Os valores de RAD para cada canal foram usados na equação inversa de Planck (2.25) e dessa forma se chegou a um valor de temperatura para o *pixel* de trabalho em cada uma das bandas. O método *split-window* foi utilizado para combinar os valores de temperatura obtidos das bandas 4 e 5, levando a um único valor de temperatura de superfície para o *pixel* de trabalho de cada imagem, já corrigido quanto ao efeito produzido pelas perturbações atmosféricas.

3.6.3. A equação típica de *split window* e a emissividade da superfície.

A determinação dos coeficientes A e B da equação (2.26) típica de *split-window* supõe conhecidos os valores das emissividades ε_4 e ε_5 da superfície, observadas respectivamente nos canais 4 e 5 do sensor AVHRR. No entanto, não é possível, somente a partir dos dados fornecidos pelo sensor, um acesso simultâneo aos valores de temperatura e de emissividade da superfície (SOBRINO et al. 1991). Assim, esses valores de emissividade devem ser obtidos por medidas feitas *in situ*, simultaneamente às passagens do satélite, utilizando metodologias de campo (SOBRINO et al., 1993) como as seguidas por HUBAND & MONTEITH (1986) e por CABALLERO (1994) em seus trabalhos.

Contudo, a não-determinação direta no campo dos valores de ε_4 e ε_5 não inviabiliza totalmente o emprego do método *split-window* na estimativa da temperatura de superfície. SOBRINO et al. (1993) descrevem algoritmos

simplificados de correção multicanal, derivados da equação típica de *split window*, que permitem obter a temperatura real da superfície quando não se dispõem do valor da emissividade da superfície no grau de conhecimento exigido pelas equações 2.27, 2.28 e 2.29. Para o caso em que apenas a emissividade média

$\varepsilon = \frac{(\varepsilon_4 + \varepsilon_5)}{2}$ é conhecida, os autores sugerem a aplicação da equação:

$$T_{\text{split window}} = T_4 + [1,17 + 0,52 \cdot (T_4 - T_5)] \cdot (T_4 - T_5) + 58 \cdot (1 - \varepsilon). \quad (3.1)$$

Considerando que o valor da emissividade da superfície é próximo da unidade, COLL et al. (1991) afirmam ser possível linearizar a dependência do valor de T_s em relação à diferença de emissividade, para os dois canais infravermelho distante, em termos da emissividade média, sendo então

$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \frac{(\varepsilon_4 + \varepsilon_5)}{2}$. Essa linearização leva, entretanto, a uma perda de informação

que se acusa no aumento dos erros de estimativa da temperatura de superfície. Para o caso do dado médio de emissividade da superfície aplicado à equação 3.1, esse erro é estimado em 0,95 K (SOBRINO et al., 1993).

No presente trabalho, o mesmo valor de emissividade para uma superfície cultivada com trigo, determinado por HUBAND & MONTEITH (1986) e utilizado no ajuste do aparelho medidor da temperatura de superfície no campo, foi usado na eq. 3.1 para os cálculos finais da estimativa de T_s .

3.7. O tratamento e a análise dos dados.

Foram calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para os valores de nível de cinza da matriz 7x7 de cada imagem. Para cada um desses valores foi calculado a temperatura de superfície corrigida conforme descrito nos itens 3.6.1 e 3.6.2. Foi observada a variabilidade desses valores em relação ao valor de temperatura de superfície calculado para o *pixel* de trabalho.

Os parâmetros psicrométricos foram calculados pelo método analítico conforme descrito por VIANELLO & ALVES (1991).

Os dados orbitais de temperatura de superfície, já corrigidos, foram correlacionados aos dados terrestres do mesmo parâmetro.

Os dados de termometria, higrometria, psicrometria, e velocidade do vento foram da mesma forma associados tanto aos valores orbitais quanto aos valores medidos *in situ* de temperatura de superfície. Nessas associações foi usado o método estatístico de correlação simples entre duas variáveis.

Foi verificada a influência de prováveis variáveis controladoras nas correlações simples pertinentes. Para tanto foi usado o método estatístico de matrizes de correlação parcial. Foi feita uma análise de regressão linear simples para cada par de variáveis correlacionadas. Os resultados das correlações, tanto simples como parciais, foram usados na seleção das variáveis que seriam submetidas às análises de regressão linear múltipla.

“Tijolo com tijolo num desenho lógico.”

*Chico Buarque de Holanda
Construção*

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados gerais.

Os dados de temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e irrigação são apresentados nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3 (Anexo 1). Nenhuma ocorrência de chuvas foi registrada nos dois primeiros meses de condução da cultura no campo (abril e maio). As precipitações se iniciaram a partir de junho apresentando para este mês, um total acumulado de 69,9 mm. A precipitação ocorrida em julho atingiu um índice aproximado ao do mês anterior, chegando a 66,2 mm. No mês de agosto foi observada a menor quantidade precipitada, tendo sido registrado o valor de 22,2 mm para um único evento naquele mês.

A temperatura do ar registrada em abrigo meteorológico apresentou valores elevados para aquela época do ano, em todo o período em que a cultura esteve no campo. As altas temperaturas associadas à baixa umidade relativa do ar e à ausência de chuvas no início do desenvolvimento vegetativo da cultura levou a uma alta demanda evaporativa da atmosfera. Visando o atendimento dessa demanda e portanto das necessidades hídricas da cultura, foram aplicadas cinco lâminas d'água de 18 mm cada, distribuídas conforme representado na figura 6.3 (Anexo 1), durante as fases de desenvolvimento vegetativo e enchimento de grãos. Desse modo, mesmo para os períodos mais críticos de disponibilidade de água no solo, as necessidades hídricas da cultura foram atendidas, não tendo sido observadas situações de déficit hídrico em todo o período em que a cultura esteve no campo.

Na ocasião do início das medidas de campo, em 1º de junho, o solo já se encontrava coberto pela parte aérea das plantas e pelos restos culturais do milho plantado anteriormente na mesma área. Isso possibilitou a desconsideração da influência da temperatura radiativa do solo nas medidas de temperatura de superfície feitas no campo, usando o termômetro de radiação infravermelha.

A tabela 4.1 mostra os resultados das principais análises de regressão linear entre os parâmetros medidos no campo e aqueles estimados a partir dos dados orbitais. Nos itens seguintes são apresentadas as análises da correlação entre alguns desses parâmetros.

Foi estudada a influência dos parâmetros meteorológicos medidos no campo, nos valores de temperatura orbital brutos e corrigidos. Os resultados das demais análises de regressão linear, bem como os valores dos resíduos para cada um dos ajustes obtidos, são mostrados respectivamente nas tabelas 6.3 e 6.4 a 6.25 (Anexo 2).

Os valores de temperatura de superfície corrigida pelo método *split window*, calculados para cada *pixel* de interesse, são mostrados na tabela 4.2. A mesma tabela mostra ainda os valores intermediários usados no cálculo dessas temperaturas corrigidas.

4.2. O geo-referenciamento.

Feito o geo-referenciamento, foi calculada a temperatura de superfície corrigida para 49 *pixels* da imagem. Cada um desses grupos de valores de temperatura de superfície formam uma matriz 7×7 de *pixels*, na qual o valor central indica a temperatura de superfície para o *pixel* de interesse, localizado no trabalho de geo-referenciamento. Desse modo, chegou-se a uma matriz para cada canal de cada uma das imagens selecionadas.

Tabela 4.1. Resultados das análises de regressão linear simples entre parâmetros medidos e estimados.

X	Y	a	b	R	R ²	Significância de F	
T _{abrigo}	T _{campo}	271,0151	0,994191	0,91	0,83	0,03	*
T _{abrigo}	T _{folha}	-0,06834	1,10275	0,94	0,88	0,02	*
T _{abrigo}	T _{split window}	269,1601	1,311726	0,92	0,85	0,03	*
T _{split window}	T _{campo}	68,94196	0,751574	0,99	0,98	1,15E-04	**
T _{campo}	T _{folha}	-283,249	1,049607	0,99	0,99	6,84E-05	**
T _{split window}	T _{folha}	-213,931	0,799256	0,99	0,99	9,44E-06	**
T _{canal4}	T _{campo}	21,74446	0,922088	0,99	0,99	4,55E-05	**
T _{canal5}	T _{campo}	-4,41491	1,014356	0,98	0,96	6,91E-04	**

T_{abrigo} Temperatura do ar (°C) medida pelo termógrafo, em abrigo meteorológico.

T_{campo} Temperatura radiativa de superfície (K) medida no campo.

T_{canal4} Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 4 do sensor.

T_{canal5} Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 5 do sensor.

T_{folha} Temperatura da folha (°C) medida por termopar de contato.

T_{split window} Temperatura radiativa de superfície (K) corrigida pelo método *split window*.

* Significativo ao nível de 5%.

** Altamente significativo ao nível de 5%.

Tabela 4.2. Valores intermediários usados nos cálculos das temperaturas de superfície fornecidas por cada imagem e corrigidas pelo método *split window*.

Imagem	Canal	Ganho	Intercepto	NC	Rlin	RAD	T(RAD)	GanhSc	IntrSc	T _{split window}
01/06 - 4h33	4	-160349504	621529728	460	79,79	79,56	278,75	-0,1493371	148,18423	279,48
	5	-185346368	711686592	432	95,11	95,06	279,20	-0,1726173	169,67931	
28/06 - 4h40	4	-166842256	629008320	412	85,95	85,94	283,26	-0,155384	149,96727	283,80
	5	-190076656	715371328	384	102,58	102,51	284,11	-0,1770227	170,55782	
28/06 - 17h12	4	-170771872	648439488	320	103,71	103,63	294,83	-0,1590437	154,60002	301,50
	5	-186938496	720414208	320	116,05	115,98	292,52	-0,1741	171,76013	
26/07 - 17h12	4	-163697280	634748992	288	107,43	107,37	297,13	-0,152455	151,33595	304,09
	5	-184647200	707054528	284	119,74	119,68	294,73	-0,1719661	168,57494	
14/08 - 4h36	4	-164209728	620520320	420	83,71	83,73	281,72	-0,1529322	147,94357	282,33
	5	-184273712	703983168	396	99,88	99,82	282,36	-0,1716183	167,84267	
14/08 - 17h09	4	-165688384	642353152	232	117,35	117,39	303,07	-0,1543093	153,14893	305,24
	5	-191118352	730788800	232	132,94	132,96	302,40	-0,1779928	174,23363	

Ganho - Coeficiente "Ganho" de calibração.

GanhSc - Coeficiente "Ganho" de calibração, dividido pelo seu fator de escala.

Intercepto - Coeficiente "Intercepto" de calibração.

IntrSc - Coeficiente "Intercepto" de calibração, dividido pelo seu fator de escala.

NC - Nível de cinza.

RAD - Radiância corrigida.

Rlin - Radiância linear

T(RAD) - Temperatura não-corrigida.

T_{split window} - Temperatura de superfície corrigida pelo método *split window*.

Durante os trabalhos de geo-referenciamento foi notado que, para todas as imagens, a solução de navegação final nunca apresentava erros maiores que três *pixels* em todas as direções. Esse fato levou à escolha do tamanho 7x7 para as matrizes de nível de cinza a serem submetidas às análises estatísticas. Os valores brutos de temperatura de superfície oferecida por cada um dos dois canais infravermelho distantes do sensor, são mostrados nas figuras 4.1 a 4.6. Os valores corrigidos das temperaturas de superfície são apresentados nas figuras 4.7 e 4.12. Foi feita uma análise estatística de cada matriz obtida. Nessa análise, foram calculados os valores de temperatura média para cada um dos canais 4 e 5 de cada imagem; o desvio padrão e coeficiente de variação de cada matriz. Os valores das análises são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Resultados das análises estatísticas feitas para cada matriz 7x7 obtida após os trabalhos de localização do *pixel* de trabalho.

imagem	Ts (K)		C.V. (%)
	média	desvio padrão	
01/06 - 4h33	280,80	1,04	0,37
28/06 - 4h40	284,15	0,42	0,14
28/06 -17h12	303,46	1,47	0,48
26/07 -17h12	306,22	2,12	0,69
14/08 - 04h36	281,93	0,60	0,21
14/08 - 17h09	305,76	1,51	0,49

A tabela 4.3 apresenta valores de desvio padrão que vão de 0,4 a 2,1 K para os valores médios de temperatura de superfície calculados e corrigidos atmosféricamente pelo método *split window*, para cada matriz. Para esses valores de desvio padrão, os dados dispostos nas matrizes têm coeficientes de variação que vão de 0,14 a 0,15 %, respectivamente.

1º de junho de 1995/ 4h33/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
281,27	280,86	280,86	280,86	281,27	280,86	280,86
280,86	280,86	280,86	280,44	280,44	280,44	280,86
279,59	280,02	279,59	279,59	279,59	279,59	279,59
278,75	278,75	279,17	278,75	279,17	279,17	279,59
279,17	278,32	278,75	278,75	278,75	279,59	280,02
278,75	279,17	279,59	279,17	279,17	280,02	280,02
278,32	279,17	279,17	279,17	279,17	279,59	279,59
1º de junho de 1995/ 4h33/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
281,04	280,59	280,59	281,04	281,04	280,59	280,59
280,59	280,59	280,59	280,59	280,59	280,59	280,59
279,67	279,67	280,13	280,13	279,67	279,67	279,67
279,21	278,74	279,21	279,21	279,21	279,67	279,67
279,21	278,74	278,74	279,21	279,21	279,67	280,13
279,21	279,21	279,67	279,67	279,67	280,13	280,13
278,74	279,21	279,21	279,21	279,21	279,67	279,67

Figura 4.1 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 4h40/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
283,26	282,83	283,26	283,26	283,68	283,26	283,26
283,26	283,26	283,26	282,83	282,83	283,26	283,26
283,68	283,68	284,11	283,68	283,26	283,26	283,68
283,26	283,68	283,68	283,26	283,68	283,26	282,83
283,26	283,26	283,26	283,26	283,68	283,68	283,26
283,68	283,26	283,26	283,68	284,11	284,11	283,68
283,26	283,68	284,11	283,68	283,68	284,11	283,68
28 de junho de 1995/ 4h40/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
284,11	283,66	283,66	284,11	284,11	284,11	283,66
284,11	284,11	284,11	283,66	283,66	283,66	284,11
284,11	284,11	284,57	284,11	284,11	283,66	284,11
283,66	284,11	284,11	284,11	284,11	284,11	283,66
284,11	283,66	283,66	283,66	284,11	284,11	283,66
284,11	283,66	283,66	284,11	284,57	284,11	284,11
284,11	284,11	284,57	284,57	284,11	284,57	284,11

Figura 4.2 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 17h12/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
296,80	296,41	296,41	296,02	296,02	296,80	297,19
297,19	296,41	296,02	295,23	296,02	296,41	296,41
296,41	296,02	295,62	295,62	296,02	295,62	295,62
296,02	295,62	295,62	294,84	294,84	294,84	296,02
296,02	296,02	295,23	294,44	295,23	295,23	295,62
296,02	295,62	295,62	295,23	294,84	294,44	295,23
296,02	296,41	296,41	296,41	296,02	295,62	296,02
28 de junho de 1995/ 17h12/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos						
294,19	293,78	293,78	293,36	293,36	294,19	294,19
294,19	293,78	293,36	292,94	293,36	293,78	293,78
293,78	293,36	292,94	292,94	293,36	293,36	293,36
293,36	293,36	292,94	292,52	292,52	292,52	293,36
293,36	293,36	292,94	292,52	292,94	292,94	292,94
293,36	292,94	292,94	292,52	292,52	292,52	292,94
293,36	293,36	293,36	293,78	293,36	292,94	293,36

Figura 4.3 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

26 de julho de 1995/ 17h12/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
298,25	298,98	297,88	297,13	296,38	297,50	297,88
298,62	298,62	297,50	296,38	296,76	298,25	297,50
298,25	297,13	296,76	297,13	297,13	297,13	296,01
298,25	297,50	297,13	297,13	297,13	299,35	298,25
297,50	297,13	297,13	297,50	297,50	298,25	298,62
297,50	297,88	297,88	298,98	300,08	300,08	298,98
298,25	298,62	297,88	299,72	300,45	299,35	299,72
26 de julho de 1995/ 17h12/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
295,55	295,96	295,14	294,73	293,91	294,73	295,14
295,96	295,55	294,73	293,91	294,32	295,14	294,73
295,55	294,73	294,32	294,73	294,73	294,32	293,91
295,55	294,73	294,73	294,73	294,73	295,96	295,55
295,14	294,73	294,32	294,73	294,73	295,55	295,96
294,73	295,14	295,14	295,96	296,77	297,17	296,36
295,55	295,96	295,14	296,77	296,77	296,36	296,77

Figura 4.4 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.

14 de agosto de 1995/ 4h36/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
280,86	280,86	280,86	280,86	280,86	280,86	280,86
281,29	281,29	281,29	280,86	280,86	281,29	281,29
282,14	282,14	281,72	281,29	280,86	280,44	281,29
280,86	281,29	281,29	281,72	281,29	280,44	280,44
280,86	280,86	280,86	281,29	281,72	281,29	280,86
281,72	282,14	282,14	282,14	282,56	281,72	281,29
282,14	282,14	282,14	282,14	282,56	282,14	282,14
14 de agosto de 1995/ 4h36/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
281,91	281,91	281,91	281,91	282,36	281,91	281,91
282,36	282,36	282,36	281,91	281,91	282,36	282,36
282,81	282,81	282,81	282,36	281,91	281,91	282,36
282,36	282,36	282,36	282,36	282,36	281,91	281,91
281,91	282,36	282,36	282,36	282,81	282,36	282,36
282,81	283,26	282,81	283,26	283,26	282,81	282,81
283,26	283,26	282,81	282,81	283,26	283,26	282,81

Figura 4.5 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

14 de agosto de 1995/ 17h09/ Canal 4/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
303,07	303,79	303,79	303,79	302,71	302,71	303,07
303,43	303,43	303,79	303,43	303,07	304,15	303,43
303,07	302,71	302,71	302,34	302,71	303,79	302,34
303,79	302,71	302,34	303,07	302,34	304,15	305,22
303,07	302,34	301,98	303,43	304,87	305,58	305,22
303,43	302,71	302,71	304,51	304,87	305,22	305,58
304,87	305,93	304,87	306,29	305,93	305,22	305,58
14 de agosto de 1995/ 17h09/ Canal 5/ Valores de Ts (K) não corrigidos.						
302,40	303,20	303,20	303,20	302,40	302,40	302,40
302,80	302,80	303,20	302,80	302,80	303,60	303,20
302,80	302,40	302,00	302,00	302,40	303,20	302,00
303,20	302,40	302,00	302,40	302,00	303,60	304,40
302,80	302,00	302,00	302,80	304,00	304,80	304,40
302,80	302,40	302,40	304,00	304,00	304,40	304,80
304,40	304,80	304,40	305,20	305,20	304,80	304,80

Figura 4.6 Matrizes 7x7 de valores de temperatura de superfície não-corrigidos para os canais 4 e 5 da imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

1º de junho de 1995/ 4h33/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
282,73	282,37	282,37	281,82	282,73	282,37	282,37
282,37	282,37	282,37	281,43	281,43	281,43	282,37
280,67	281,65	280,28	280,28	280,67	280,67	280,67
279,48	279,91	280,29	279,48	280,29	279,88	280,67
280,29	279,08	279,91	279,48	279,48	280,67	281,05
279,48	280,29	280,67	279,88	279,88	281,05	281,05
279,08	280,29	280,29	280,29	280,29	280,67	280,67

Figura 4.7 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 4h33 (GMT) do dia 1º de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 4h40/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
283,80	283,38	284,04	283,80	284,44	283,80	284,04
283,80	283,80	283,80	283,38	283,38	284,04	283,80
284,44	284,44	284,84	284,44	283,80	284,04	284,44
284,04	284,44	284,44	283,80	284,44	283,80	283,38
283,80	284,04	284,04	284,04	284,44	284,44	284,04
284,44	284,04	284,04	284,44	284,84	285,26	284,44
283,80	284,44	284,84	284,22	284,44	284,84	284,44

Figura 4.8 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 4h40 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

28 de junho de 1995/ 17h12/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
304,54	304,25	304,25	303,97	303,97	304,54	306,52
306,52	304,25	303,97	301,80	303,97	304,25	304,25
304,25	303,97	303,68	303,68	303,97	302,11	302,11
303,97	302,11	303,68	301,50	301,50	301,50	303,97
303,97	303,97	301,80	299,76	301,80	301,80	303,68
303,97	303,68	303,68	303,39	301,50	299,76	301,80
303,97	305,98	305,98	304,25	303,97	303,68	303,97

Figura 4.9 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 28 de junho de 1995.

26 de julho de 1995/ 17h12/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
306,34	308,45	306,12	304,09	303,62	305,90	306,12
306,56	308,25	305,90	303,62	303,85	308,05	305,90
306,34	304,09	303,85	304,09	304,09	305,68	301,91
306,34	305,90	304,09	304,09	304,09	310,47	306,34
304,33	304,09	305,68	305,90	305,90	306,34	306,56
305,90	306,12	306,12	308,45	310,84	309,06	306,78
306,34	306,56	306,12	308,85	312,95	308,65	308,85

Figura 4.10 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 17h12 (GMT) do dia 26 de julho de 1995.

14 de agosto de 1995/ 4h36/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
281,37	281,37	281,37	281,37	281,44	281,37	281,37
281,79	281,79	281,79	281,37	281,37	281,79	281,79
282,75	282,75	282,22	281,79	281,37	281,00	281,79
281,44	281,79	281,79	282,34	281,79	281,00	281,00
281,37	281,44	281,44	281,79	282,22	281,79	281,44
282,22	282,64	282,75	282,64	283,16	282,22	281,87
282,64	282,64	282,75	282,75	283,16	282,64	282,75

Figura 4.11 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 4h36 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

14 de agosto de 1995/ 17h09/ Valores de Ts (K) corrigidos.						
305,25	305,82	305,82	305,82	304,28	304,28	305,25
305,53	305,53	305,82	305,53	304,58	306,10	304,88
304,58	304,28	304,96	303,97	304,28	305,82	303,97
305,82	304,28	303,97	305,25	303,97	306,10	307,69
304,58	303,97	303,12	305,53	307,42	307,96	307,69
305,53	304,28	304,28	306,39	307,42	307,69	307,96
306,68	309,09	306,68	309,34	308,24	306,97	307,96

Figura 4.12 Matrizes 7x7 dos valores de temperatura de superfície corrigidos pelo método *split window* para a imagem feita às 17h09 (GMT) do dia 14 de agosto de 1995.

Os resultados apresentados dessas análises mostram a baixa variabilidade entre os valores de temperatura de superfície calculados para cada par de valores de nível de cinza contido na matriz. Admitindo que o *pixel* a ser selecionado no trabalho de geo-referenciamento seja algum daqueles contido na matriz, que não o central, o erro do valor de temperatura de superfície calculada fica no intervalo entre 0,4 e 2,1 graus Kelvin, respectivamente. Esses valores de erro no cálculo da temperatura de superfície estão abaixo dos valores de 2 a 3 °C, indicados por SEGUIN (1984) como de efeito para cálculo de evapotranspiração.

4.3. A T_s medida no campo e as temperaturas do ar, umidade absoluta do ar e velocidade do vento.

A temperatura do ar registrada pelo termógrafo foi correlacionada à temperatura do ar medida pelo termômetro de bulbo seco do psicrômetro de aspiração. O coeficiente obtido dessa correlação foi o de 0,89 indicando um alto grau de associação entre essas duas variáveis. Considerando a maior precisão das medidas feitas pelo termômetro de bulbo seco, essa associação permite inferir a respeito da confiabilidade das medidas registradas pelo termógrafo. A figura 4.13 mostra a reta de ajuste encontrada para as observações de T_{abrigo} e $T_{\text{psicrômetro}}$. Desse modo, foram considerados apenas os valores de temperatura do ar medidos no abrigo meteorológico, para as correlações nas quais esse parâmetro foi requerido.

A temperatura radiativa da superfície medida no campo pelo termômetro de radiação infravermelha foi correlacionada à temperatura do ar T_{abrigo} , obtendo-se o coeficiente de correlação de 0,91. A reta de ajuste entre os pontos dessa correlação são mostrados na figura 4.14. Diversos autores, dentre eles OMETTO (1983), afirmam existir uma dependência dos valores de temperatura de superfície com a temperatura do ar próximo a ela. Essa dependência foi verificada pelo resultado da correlação entre esses dois parâmetros.

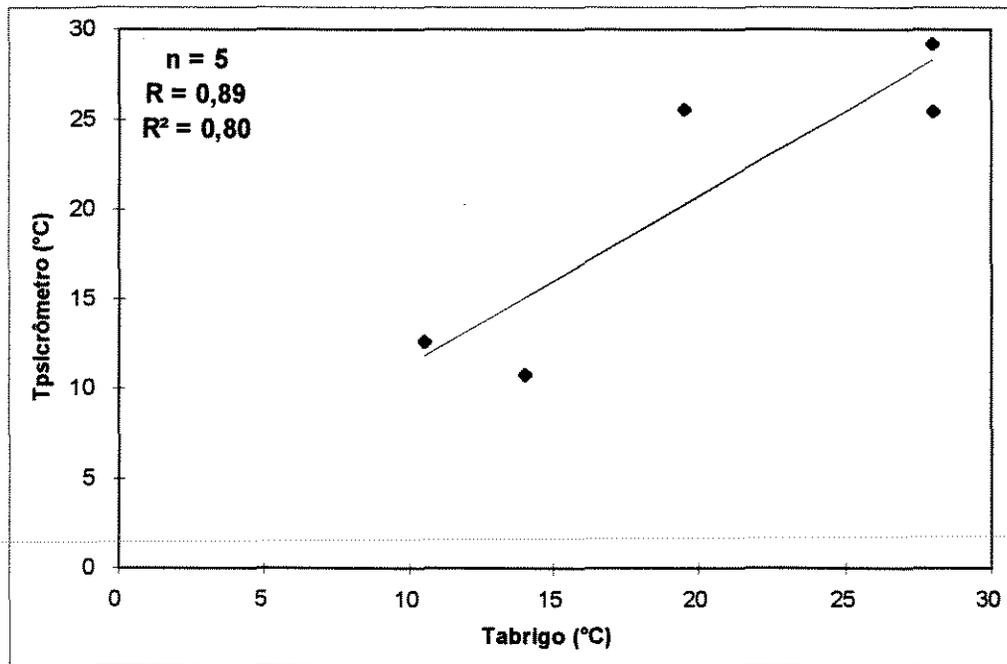


Figura 4.13. Reta de ajuste de $T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C})$ x $T_{\text{psicrômetro}} (^{\circ}\text{C})$.

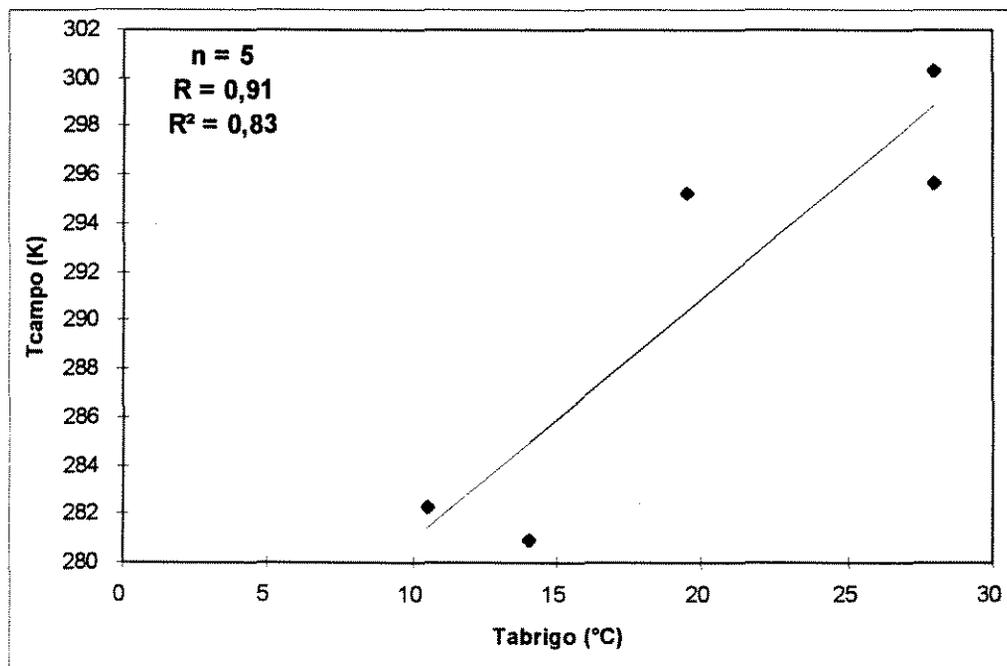


Figura 4.14. Reta de ajuste de $T_{\text{abrigo}} (^{\circ}\text{C})$ x $T_{\text{campo}} (\text{K})$.

Os valores observados de T_{campo} e de U_{absoluta} apresentaram coeficiente de correlação parcial de -0,17 quando as variáveis controladoras são a temperatura do ar e a velocidade do vento. Isso indica pequena dependência da umidade absoluta do ar nos valores observados para a temperatura de superfície medida no campo. Para a correlação parcial entre essas mesmas variáveis controladas apenas pela velocidade do vento, o coeficiente obtido foi o de 0,11. Quando controladas apenas pela temperatura do ar, o coeficiente foi o de 0,70. Esses resultados indicam uma maior influência da velocidade do vento que da temperatura do ar na associação medida entre T_{campo} e U_{absoluta} . Este último coeficiente de correlação é próximo do coeficiente 0,77, encontrado para a correlação simples entre essas duas variáveis. A figura 4.15 ilustra esse ajuste, bem como a dispersão dos pontos em relação à reta. Feita a análise de regressão entre essas variáveis, foi verificada a não-significância ao nível de 5% para a reta de ajuste entre os pontos representativos das observações.

Apesar da alta associação entre T_{campo} e U_{absoluta} , a não-significância do coeficiente de regressão encontrado pode estar indicando a pouca influência que a quantidade de vapor d'água presente entre o sensor do aparelho e o topo das plantas teve nas medidas de T_{campo} .

O coeficiente no valor de 0,56 encontrado para a correlação simples entre V_{vento} e T_{campo} indica um baixo grau de associação entre essas variáveis, conforme mostrado na figura 4.16. O coeficiente de regressão no valor de 0,32 obtido para essas mesmas variáveis, também pode ser considerado como suficientemente baixo para que se possa inferir a respeito da influência da velocidade do vento nas medidas de temperatura de superfície feitas no campo. Entretanto, o fato de as medidas de V_{vento} terem sido feitas em horário não-simultâneo às medidas de T_{campo} pode ser apontado como uma provável causa para o baixo grau de associação encontrado entre essas duas variáveis.

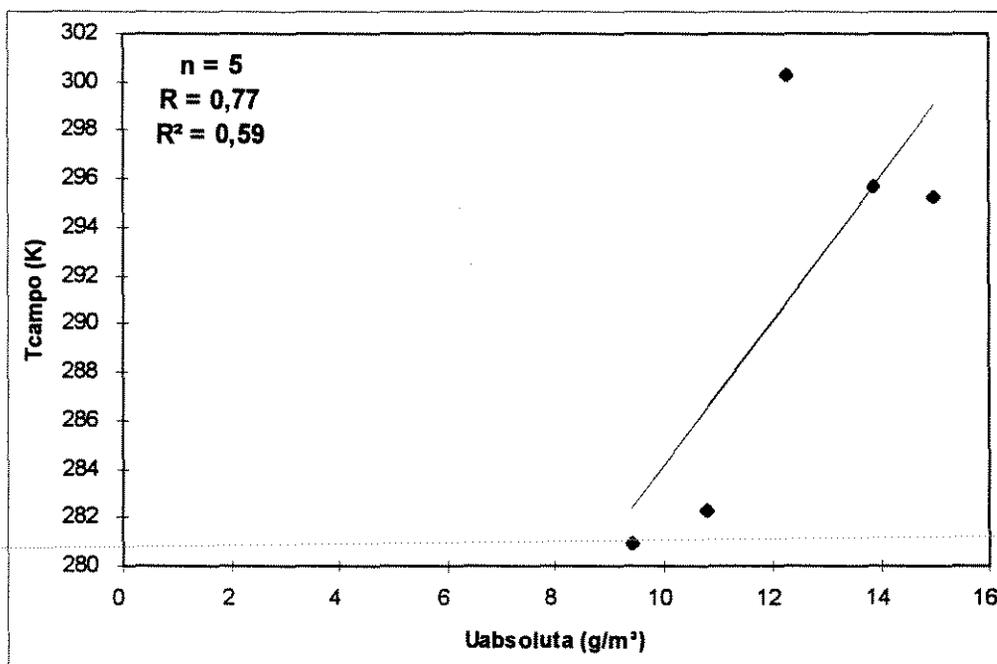


Figura 4.15. Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m^3) x T_{campo} (K).

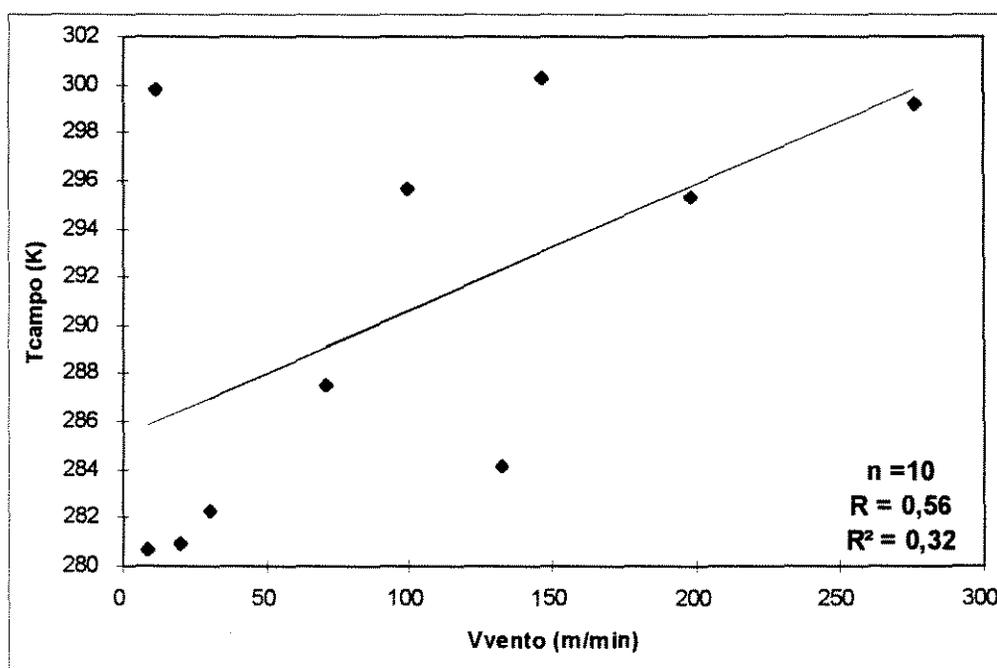


Figura 4.16. Reta de ajuste de V_{vento} (m/min) x T_{campo} (K).

O baixo grau de associação entre a velocidade do vento e as medidas de T_{campo} foram comprovadas pelo coeficiente de correlação parcial entre essas duas variáveis quando controladas pela umidade absoluta do ar. Esse coeficiente no valor de 0,58 é bem próximo daquele obtido para a correlação simples entre as mesmas variáveis, confirmando-o e indicando a não-influência de U_{absoluta} na correlação.

4.4. A temperatura da folha e as umidades absoluta e relativa do ar

A temperatura medida diretamente na folha por contato, é aqui considerada como valor padrão a ser comparado às demais medidas de temperatura de superfície. A exemplo dos resultados apresentados na análise de regressão entre T_{abrigo} e T_{campo} , a significância obtida na regressão entre T_{folha} e T_{abrigo} levam à consideração de que esses parâmetros estão associados. A figura 4.17 mostra a reta de ajuste entre os pontos representativos das observações de T_{folha} e T_{abrigo} , bem como a dispersão dos mesmos em torno dessa reta.

Numa análise de correlação parcial entre T_{folha} e T_{abrigo} controladas por U_{absoluta} , o alto coeficiente de correlação encontrado, no valor de 0,96, é muito próximo do valor do coeficiente de correlação no valor de 0,94, encontrado quando não são controladas por nenhuma outra variável. Esse fato indica a não-interferência de U_{absoluta} na associação de T_{folha} com T_{abrigo} , confirmando o alto grau de associação existente entre essas variáveis, bem como a significância do ajuste obtido entre seus pontos.

A correlação positiva e altamente significativa encontrada na comparação entre os dados de temperatura da folha e umidade relativa do ar levam à consideração de que este parâmetro influencia grandemente a temperatura da parte aérea da vegetação. A reta de ajuste representativa da correlação entre estes dois parâmetros encontra-se na figura 4.18.

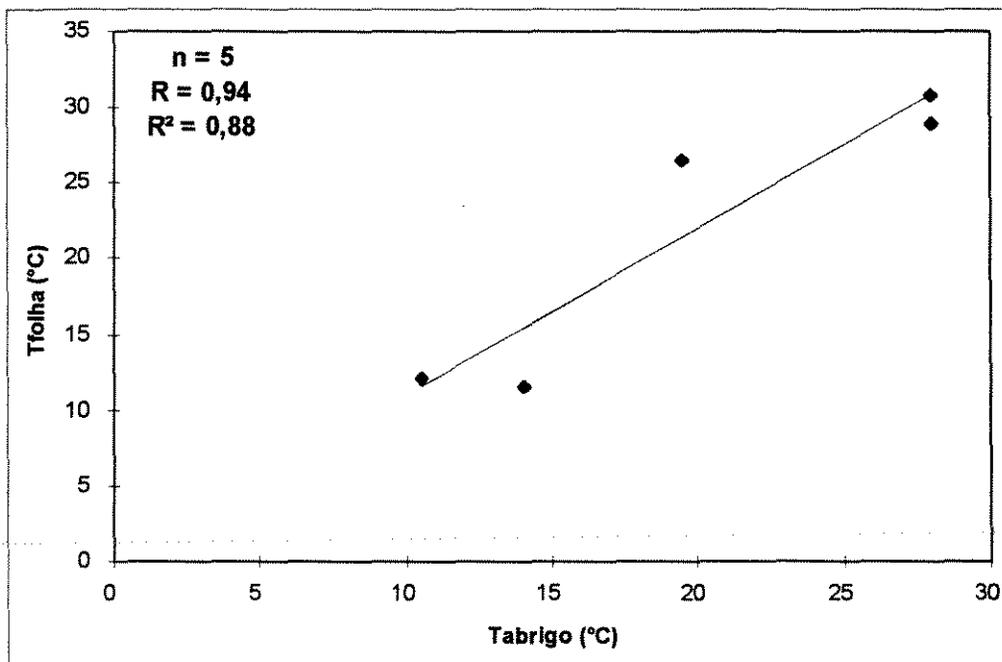


Figura 4.17. Reta de ajuste de T_{folha} (°C) x T_{abrigo} (°C).

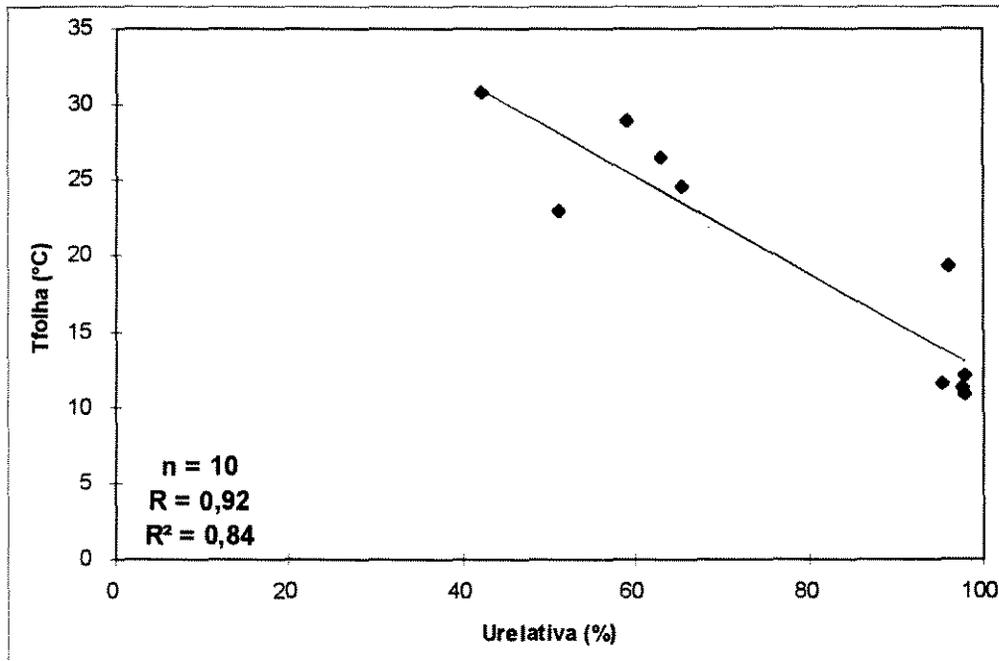


Figura 4.18. Reta de ajuste de T_{folha} (°C) x $U_{relativa}$ (%).

4.5. A T_s corrigida pelo método *split window* e a temperatura do ar, a umidade absoluta do ar e o ângulo de visada.

Os valores de temperatura de superfície obtidos a partir dos dados orbitais e corrigidos atmosféricamente também foram correlacionados aos valores de temperatura do ar. A reta de ajuste entre os pontos representativos de $T_{split\ window}$ e T_{abrigo} está representada na figura 4.19. O alto valor da correlação obtida entre a temperatura de superfície medida pelo satélite e a temperatura do ar pode ser comparado aos também bons valores das correlações observadas deste parâmetro, tanto com T_{campo} quanto com T_{folha} . Para o primeiro caso, a correlação simples entre $T_{split\ window}$ e T_{abrigo} , o coeficiente encontrado foi o de 0,92. Este valor é bastante próximo dos valor de 0,96, encontrado para o coeficiente de correlação parcial quando a variável controladora é a umidade absoluta do ar. Isso indica a não-influência da quantidade de vapor d'água no ajuste obtido para $T_{split\ window}$ e T_{abrigo} .

Os valores de $T_{split\ window}$, quando correlacionados aos valores de $U_{absoluta}$ apresentam também um alto valor, de 0,83. A dispersão desses pontos bem como a reta que melhor se ajusta a eles, pode ser observada na figura 4.20. O alto valor do coeficiente de correlação simples encontrado para esses dois parâmetros indica um alto grau de associação existente entre a quantidade de vapor d'água e a temperatura medida pelo satélite. Entretanto a não significância dada pelo valor de R^2 obtido da análise de regressão linear entre esses parâmetros pode estar indicando a pouca influência da umidade absoluta do ar nos valores observados de $T_{split\ window}$.

As passagens dos satélites foram cuidadosamente selecionadas de modo que em todas elas, o satélite registrasse a imagem da área de trabalho num ângulo de visada que causasse mínimas distorções nas imagens. As imagens utilizadas foram feitas em baixos ângulos de visada, o que levou à baixa influência desse parâmetro no valor corrigido de temperatura de superfície.

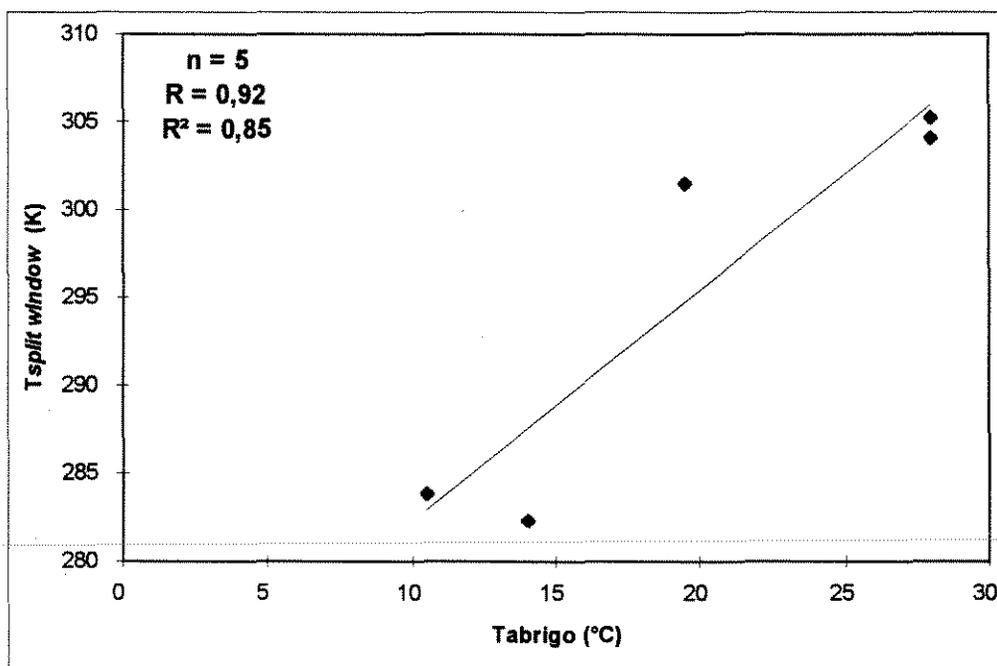


Figura 4.19. Reta de ajuste de T_{abrigo} (°C) x $T_{split\ window}$ (K).

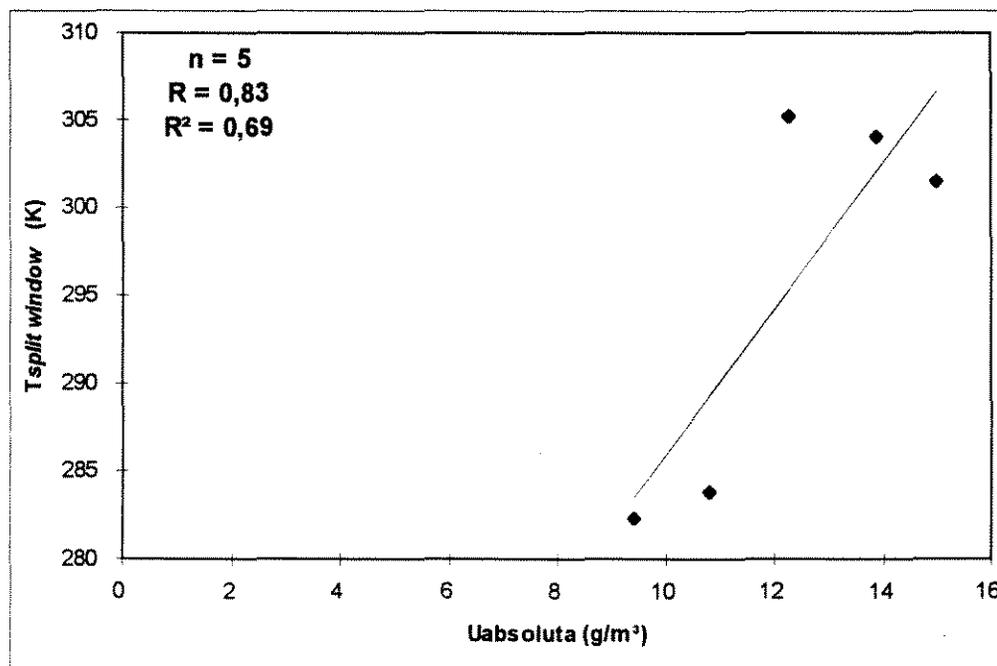


Figura 4.20. Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m³) x $T_{split\ window}$ (K).

Esta situação é ilustrada na figura 4.21. Essa figura mostra a grande dispersão dos pontos em torno da reta de ajuste, indicando a pouca significância dos dados. Mesmo sendo baixo, o valor negativo do coeficiente de correlação encontrado entre os valores dos ângulos de visada permite observar que grandes ângulos de visada podem levar a valores superestimados de temperatura de superfície calculada a partir de dados orbitais. Dessa forma fica atestada a importância da aquisição de imagens minimamente afetadas pelos efeitos de distorção provocados por grandes ângulos de visada.

4.6. As temperatura de superfície medida no campo, a temperatura da folha e a corrigida pelo método *split window*.

Os gráficos referentes às correlações simples entre as temperaturas de superfície medida no campo e a orbital corrigida e destas entre a temperatura da folha, podem ser observados nas figuras 4.22, 4.23 e 4.24. Essas figuras mostram as altas correlações obtidas entre esses parâmetros. Os altos coeficientes de regressão linear obtidos para a análise de T_{folha} tanto com T_{campo} quanto com $T_{split\ window}$, demonstram a alta significância dos coeficientes de correlação simples obtidos entre esses parâmetros. Isso leva à boa aceitação do ajuste obtido para os pontos e a confiabilidade da correlação.

O alto coeficiente de correlação parcial encontrado entre T_{campo} e T_{folha} quando controladas por $U_{absoluta}$ e por T_{abrigo} , no valor de 0,99, é igual ao coeficiente de correlação simples entre aquelas variáveis. Isso indica a baixa influência tanto de $U_{absoluta}$ quanto de T_{abrigo} na correlação simples, comprovando o alto grau de associação encontrado. A correlação parcial entre T_{campo} e T_{folha} quando controladas por $U_{absoluta}$ e V_{vento} , apresenta o mesmo valor de 0,99, indicando a também pouca influência da velocidade do vento no ajuste obtido para os pontos de T_{campo} e T_{folha} . A não-simultaneidade das medidas dessas variáveis com as de V_{vento} pode ser, também aqui, apontada como uma provável causa desse resultado.

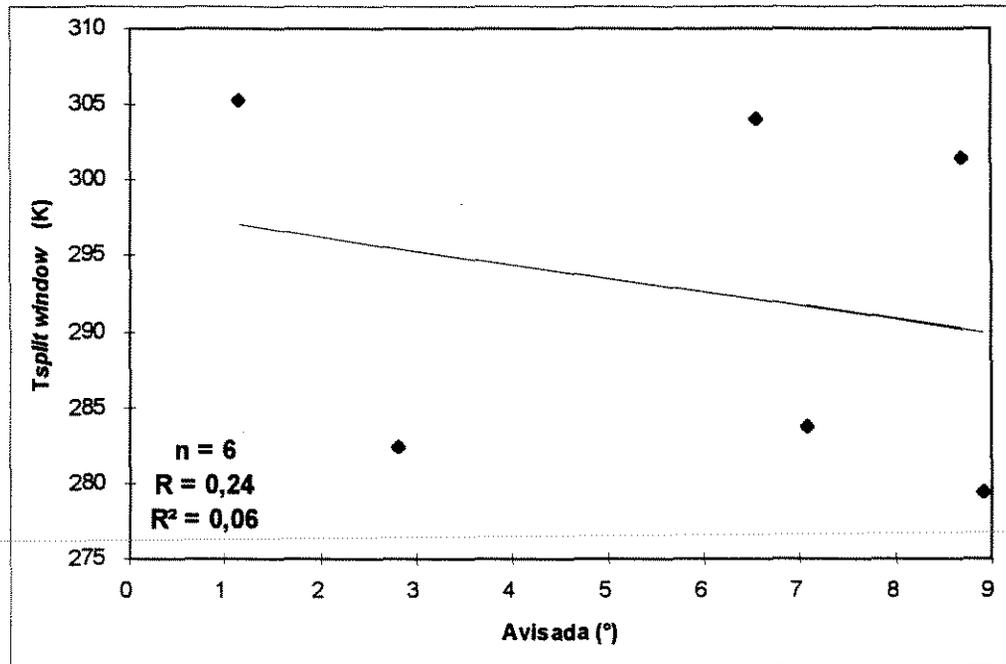


Figura 4.21. Reta de ajuste de A_{visada} (°) x $T_{split\ window}$ (K).

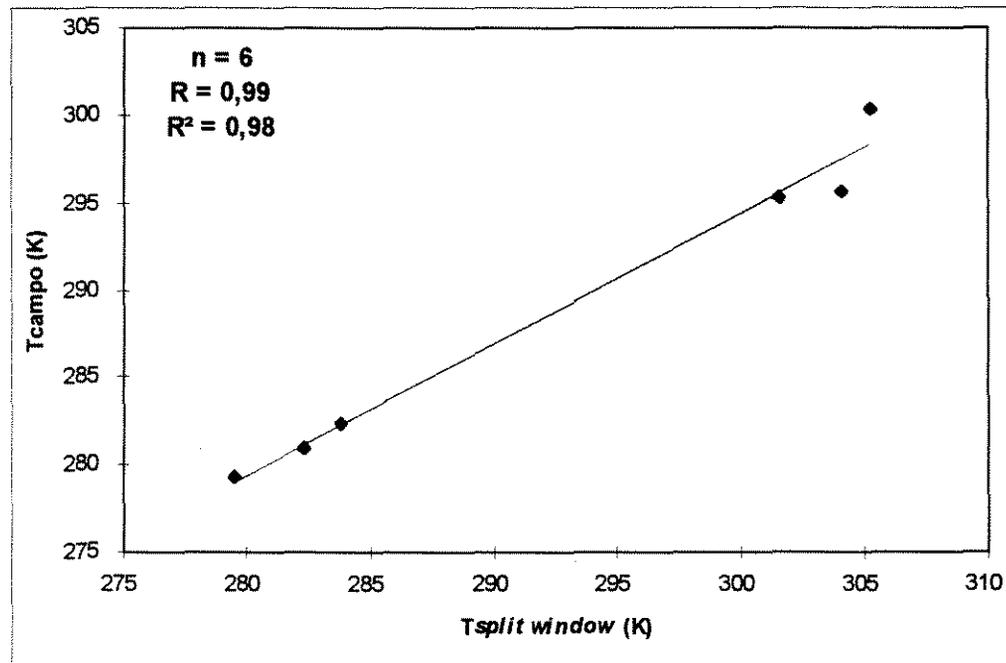


Figura 4.22. Reta de ajuste de $T_{split\ window}$ (K) x T_{campo} (K).

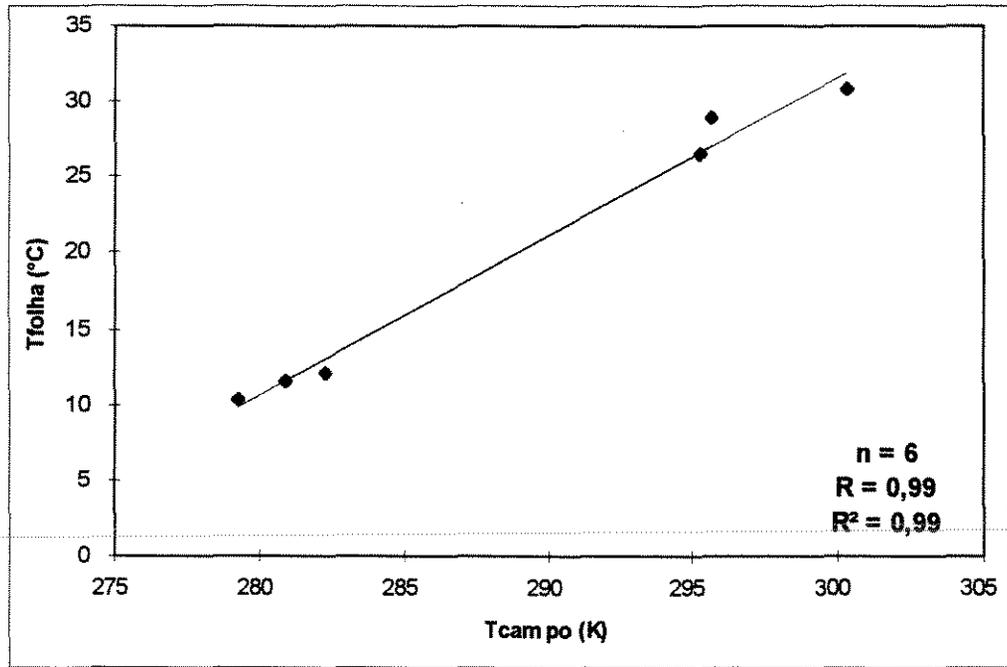


Figura 4.23. Reta de ajuste de T_{campo} (K) x T_{folha} (°C).

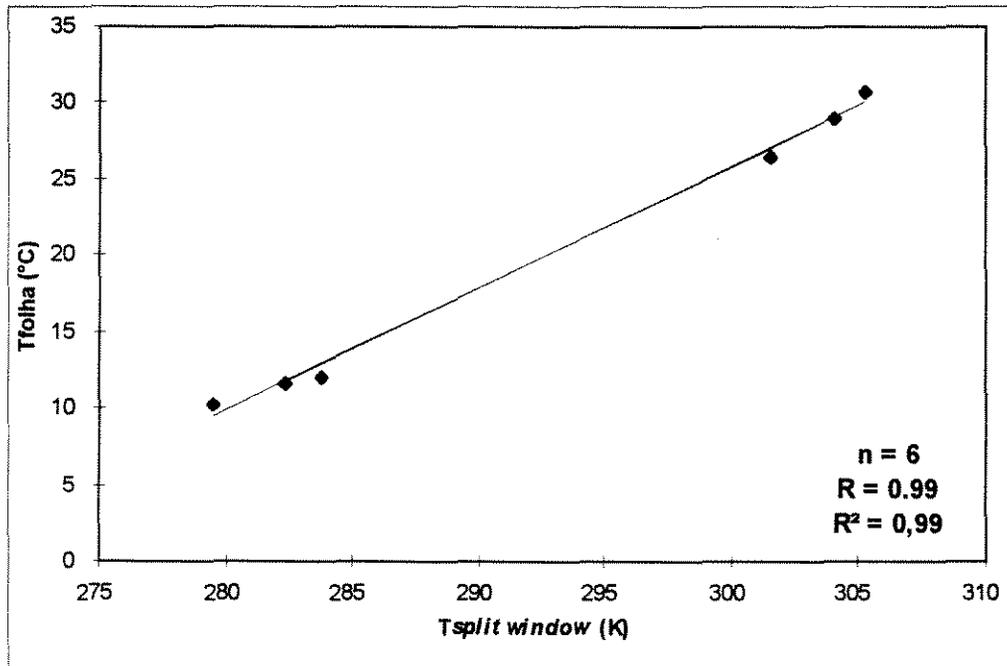


Figura 4.24. Reta de ajuste de $T_{split\ window}$ (K) x T_{folha} (°C).

O coeficiente no valor de 0,99, encontrado para a correlação parcial entre $T_{split\ window}$ e T_{folha} , controlada pelas temperatura e umidade absoluta do ar é igual ao valor encontrado para o coeficiente que mede a correlação simples entre essas duas variáveis. Isso indica a não-influência tanto de $U_{absoluta}$ quanto de T_{abrigo} na correlação da temperatura corrigida medida pelo satélite e a temperatura da folha, medida no campo.

O fato de $U_{absoluta}$ não estar influenciando nos valores observados de $T_{split\ window}$ podem estar mostrando a eficiência da equação de *split window* usada na correção atmosférica dos dados orbitais brutos de temperatura de superfície.

Uma vez T_{folha} seja considerada como padrão, a boa correlação de seus valores com os de T_{abrigo} levam a inferir a respeito da boa qualidade das medidas de T_{campo} . Esta conclusão é obtida baseando-se na também boa correlação encontrada entre os valores de T_{abrigo} e T_{campo} e desta com T_{folha} . A alta associação entre essas duas últimas variáveis é representada pelo coeficiente de correlação simples no valor de 0,99. O coeficiente de correlação parcial para as mesmas variáveis quando controladas por $U_{absoluta}$ e por T_{abrigo} é também de 0,99. Esse valor é igual ao coeficiente de correlação obtido quando as variáveis controladoras são $U_{absoluta}$ e V_{vento} . Esses resultados indicam a confiabilidade da correlação simples obtida entre T_{campo} e T_{folha} . Desse modo é natural supor que os valores medidos de T_{campo} são portanto representativos da realidade terrestre.

4.7. As temperaturas de superfície não-corrigidas calculadas para cada canal infravermelho-distante do sensor.

As temperaturas brutas, T_{canal4} e T_{canal5} , obtidas para cada um dos canais infravermelho do sensor foram correlacionadas aos valores de T_{campo} e aos valores de $U_{absoluta}$ medidos no momento das passagens do satélite. Os gráficos representativos dos ajustes obtidos nas análises de regressão para esses pontos são apresentados nas figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28.

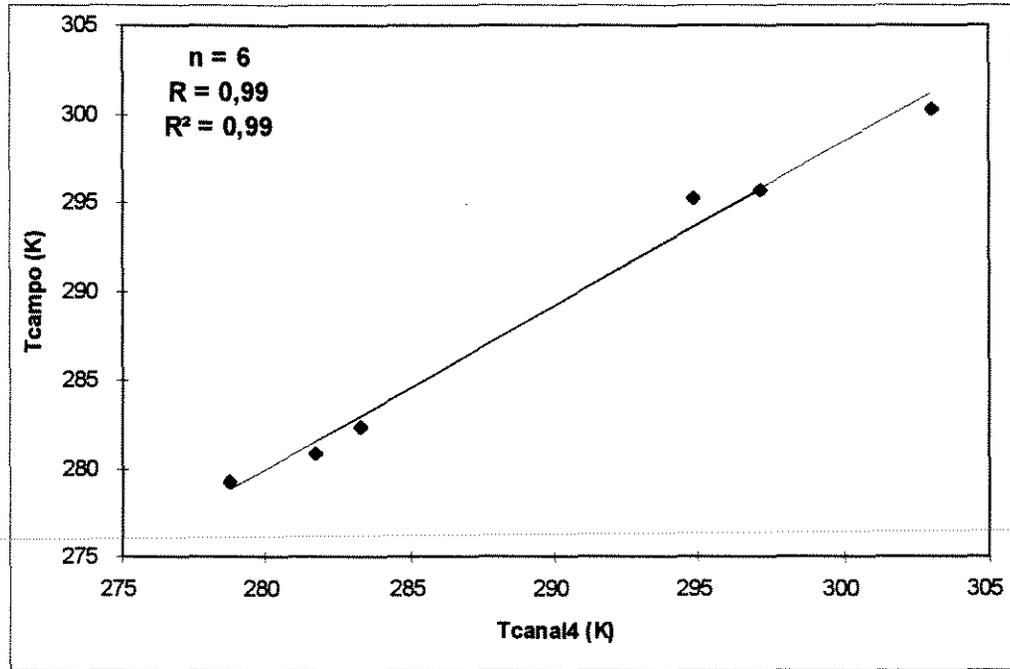


Figura 4.25. Reta de ajuste de T_{canal4} (K) x T_{campo} (K).

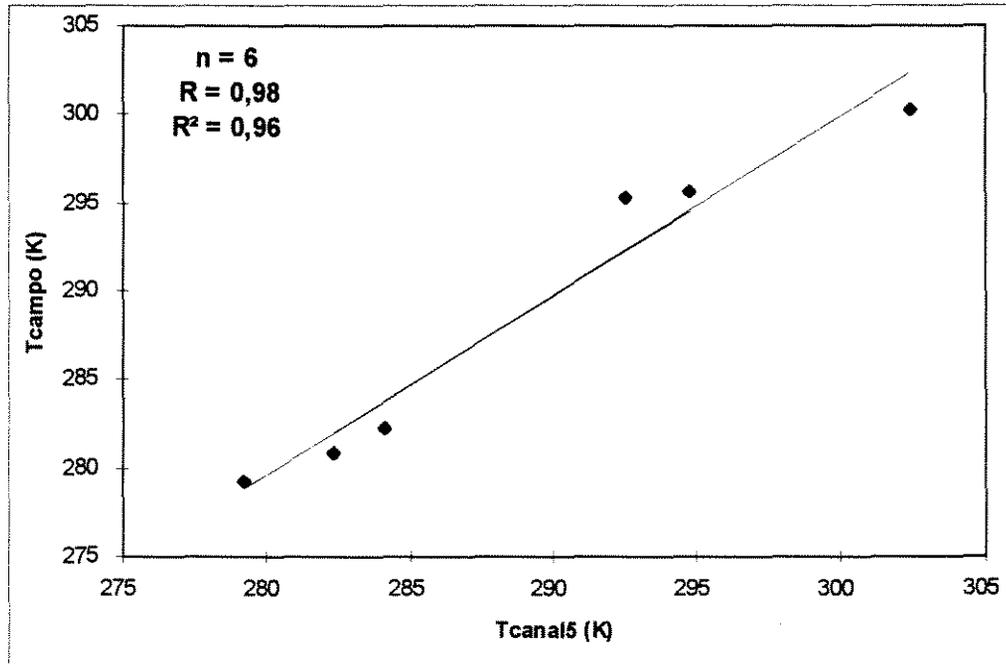


Figura 4.26. Reta de ajuste de T_{canal5} (K) x T_{campo} (K).

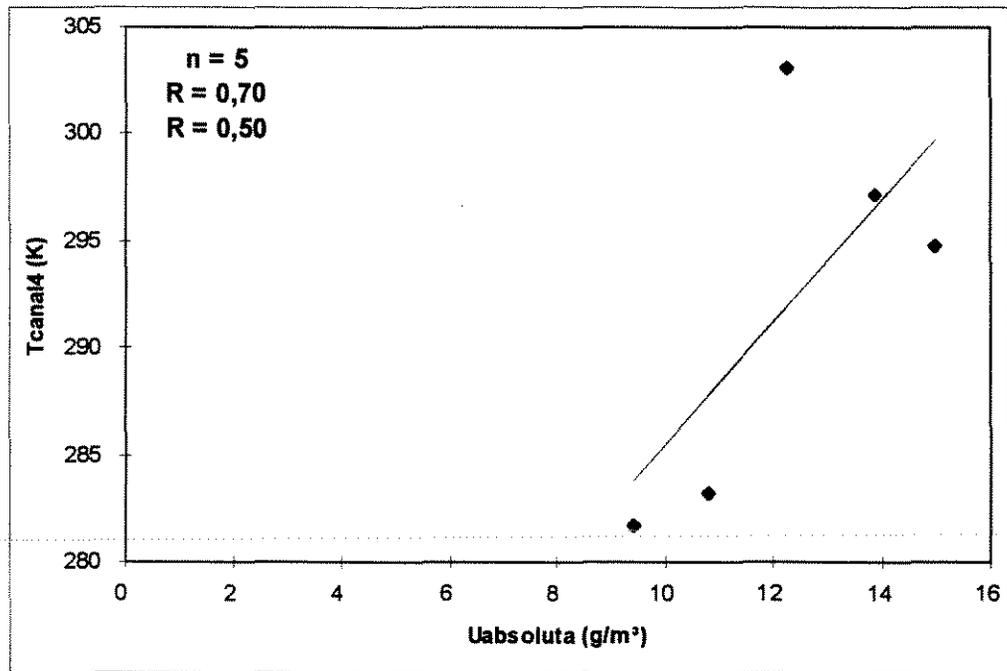


Figura 4.27. Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m^3) x T_{canal4} (K).

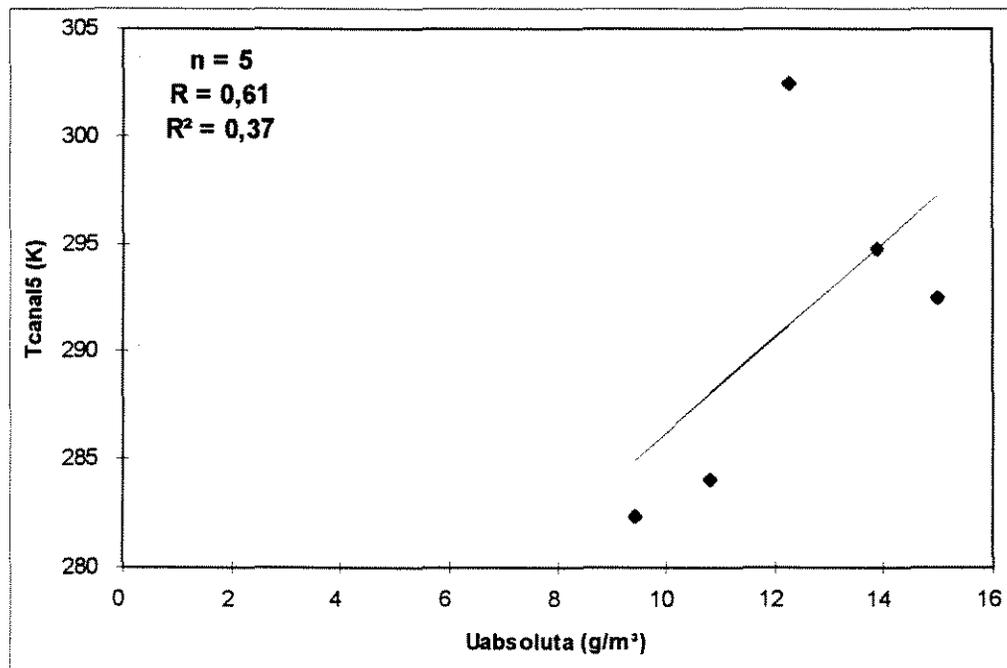


Figura 4.28. Reta de ajuste de $U_{absoluta}$ (g/m^3) x T_{canal5} (K).

O alto grau de associação verificado tanto para a correlação entre T_{campo} e T_{canal4} , quanto para o mesmo parâmetro e T_{canal5} , demonstram a pequena influência da absorção atmosférica na medida radiométrica da temperatura de superfície realizada separadamente por cada um dos canais. Essa pequena influência pode ser observada mesmo considerando a absorção diferencial da radiação infravermelha-distante pelo vapor d'água para cada faixa de comprimento de onda em que opera cada um desses canais.

Quando as temperaturas brutas fornecidas por cada canal são correlacionadas à temperatura de superfície medida no campo, observa-se um menor grau de associação entre a temperatura fornecida pelo canal 5 que aquela obtida para o canal 4. Este fato pode estar indicando a absorção diferencial da radiação do vapor d'água nos diferentes canais infravermelho-distantes do sensor. Nesse caso, a temperatura fornecida pelo canal 5 é que estaria sofrendo os maiores efeitos de absorção atmosférica. Esses resultados indicam a importância de se considerar a absorção diferencial do vapor d'água em cada um dos canais utilizados pelo sensor.

A correlação parcial de T_{canal4} com T_{folha} , controlada por U_{absoluta} e por T_{abrigo} apresentou o valor de 0,83. Esse valor é menor que o de 0,97, encontrado na correlação parcial de T_{canal5} com T_{folha} , controlada pelas mesmas variáveis da correlação anterior. Isso apóia a afirmação de que a temperatura bruta fornecida pelo canal 4 sofre menos a influência da quantidade do vapor d'água que aquela oferecida pelo canal 5 do sensor.

A exemplo da correlação obtida entre $T_{\text{split window}}$ e o A_{visada} , este parâmetro quando correlacionado ao nível de cinza de cada um dos canais apresentou baixos graus de associação, sendo 0,51 e 0,40 os coeficientes de correlação simples entre A_{visada} e as variáveis NC_{canal4} e NC_{canal5} , respectivamente. As figuras 4.29 e 4.30 mostram a alta dispersão dos pontos nessas correlações.

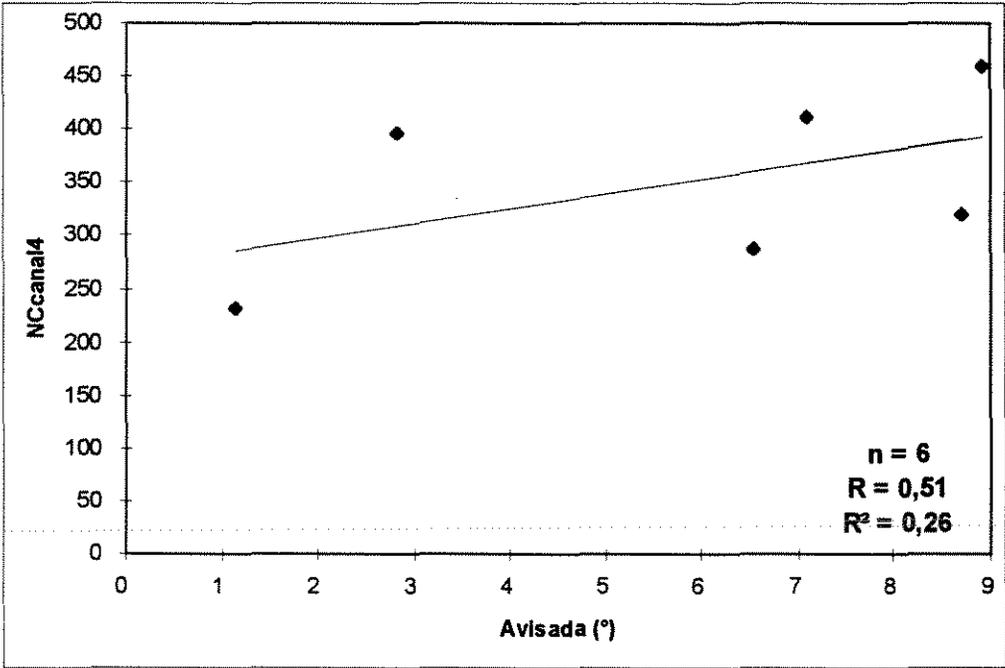


Figura 4.29. Reta de ajuste de $A_{visada} (^\circ) \times NC_{canal4}$.

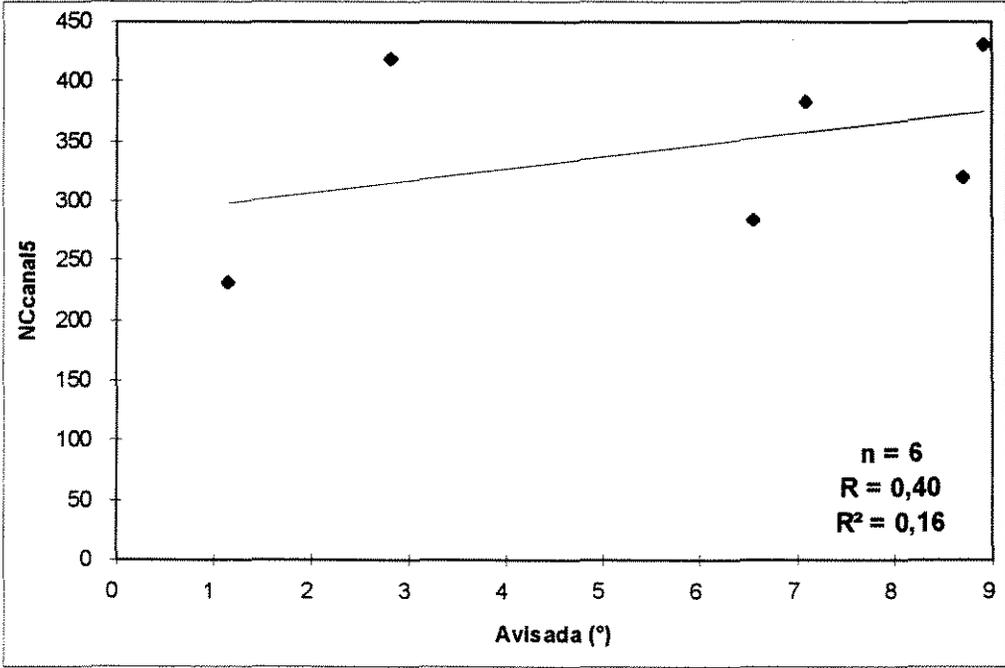


Figura 4.30. Reta de ajuste de $A_{visada} (^\circ) \times NC_{canal5}$.

A não-significância dos ajustes encontrados para os pontos de NC_{canal4} e NC_{canal5} com A_{visada} , não permitem inferir a respeito da influência dos ângulos de visada do satélite nos valores de nível de cinza de cada canal infravermelho-distante do sensor. Esse resultado já era esperado, considerando a baixa associação encontrada para A_{visada} e $T_{\text{split window}}$ que também apresentaram um valor não-significativo de R^2 na sua análise de regressão linear.

A mesma observação pode ser feita com relação aos efeitos causados pelos ângulos de visada nas temperaturas obtidas de T_{canal4} e T_{canal5} . Os coeficientes obtidos para as correlações simples tanto de T_{canal4} quanto de T_{canal5} com A_{visada} têm os respectivos valores de 0,38 e 0,46. Esses valores estão muito próximos dos coeficientes encontrados para as correlações simples de A_{visada} com NC_{canal4} e NC_{canal5} .

Da mesma forma, os valores encontrados para R^2 nas regressões lineares de T_{canal4} e T_{canal5} com A_{visada} são não-significativos, não estando também essas variáveis, correlacionadas linearmente. As figuras 4.31 e 4.32 mostram, respectivamente, as retas de ajuste para A_{visada} correlacionada com T_{canal4} e com T_{canal5} .

4.8. T_{campo} em função das variáveis T_{folha} , U_{absoluta} , $T_{\text{psicrômetro}}$ e V_{vento} e a equação da estimativa da T_s cultivada com trigo, usando dados NOAA-14/AVHRR.

As variáveis T_{folha} , U_{absoluta} , $T_{\text{psicrômetro}}$ e V_{vento} foram submetidas a uma análise de regressão linear múltipla contra os valores observados de T_{campo} . Os resultados dessa análise se encontram na tabela 4.4. A escolha dessas variáveis para a análise de regressão múltipla contra T_{campo} foi feita baseando-se nos resultados observados das correlações simples entre cada uma dessas variáveis e os valores observados de T_{campo} .

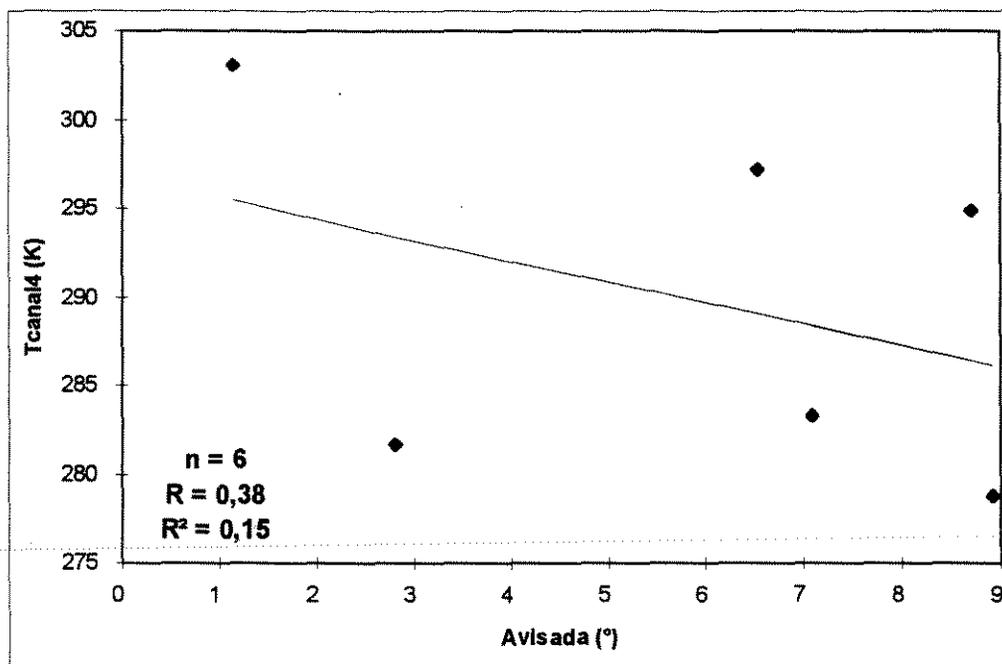


Figura 4.31. Reta de ajuste de A_{visada} ($^{\circ}$) \times T_{canal4} .

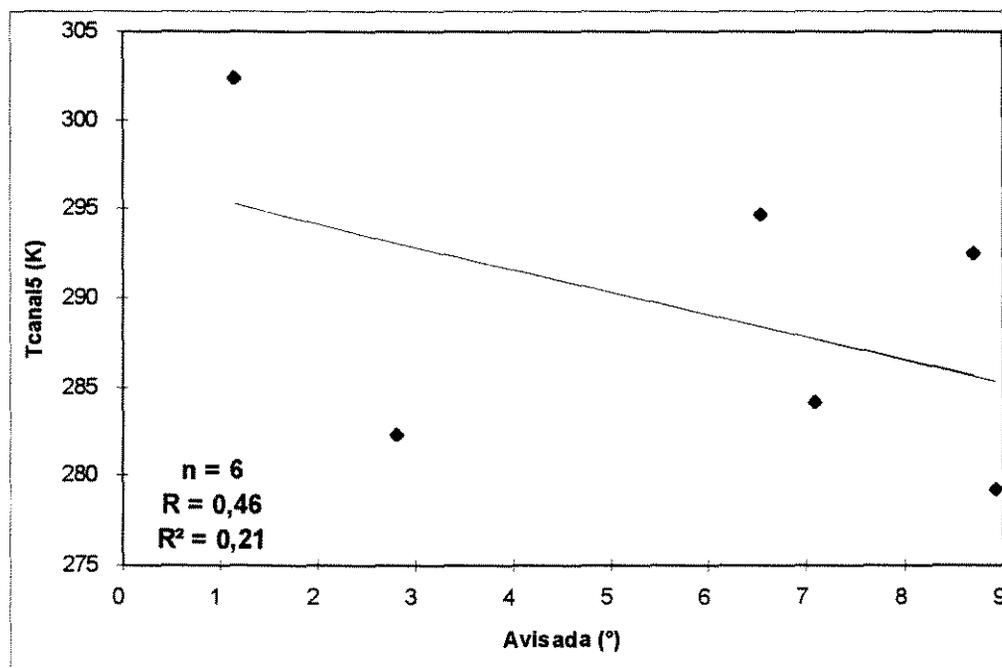


Figura 4.32. Reta de ajuste de A_{visada} ($^{\circ}$) \times T_{canal5} .

A velocidade do vento, apesar de ter apresentado um baixo coeficiente de correlação com T_{campo} além de um valor de R^2 não-significativo, foi considerada na análise de regressão linear múltipla. A decisão de considerar também esse parâmetro foi tomada baseando-se na maior influência da velocidade do vento que da temperatura do ar na associação medida entre T_{campo} e U_{absoluta} , conforme observado nos resultados da correlação parcial entre essas variáveis, quando controladas tanto por V_{vento} , como quando a variável controladora é T_{abrigo} .

Tabela 4.4. Resultados das análises de regressão linear múltipla entre T_{campo} e T_{folha} ; U_{absoluta} ; $T_{\text{psicrômetro}}$; V_{vento} e entre T_{campo} e NC_{canal4} ; NC_{canal5} .

X	Y	a	b	R	R^2	F
U_{absoluta}	T_{campo}	-1,96247				
V_{vento}	T_{campo}	0,026014	287,4328	0,97	0,94	0,03 *
T_{folha}	T_{campo}	0,750883				
$T_{\text{psicrômetro}}$	T_{campo}	0,455006				
NC_{canal4}	T_{campo}	-0,03896	327,1834	0,98	0,96	0,01 **
NC_{canal5}	T_{campo}	-0,07105				

A equação da estimativa da temperatura de superfície foi obtida a partir da regressão linear múltipla de T_{campo} com NC_{canal4} e NC_{canal5} . Os resultados obtidos nessa análise são também apresentados na tabela 4.4. Além do alto grau de associação encontrado entre essas variáveis e do valor altamente significativo do ajuste dos pontos, dois outros fatores foram considerados na escolha das variáveis para a obtenção da equação proposta:

a) os resultados obtidos das correlações entre T_{campo} e U_{absoluta} que levaram à conclusão de que a umidade absoluta do ar não influenciou nas medidas de temperatura radiativa da superfície feitas no campo. Uma provável causa para esse resultado é a pequena distância de 1,0 m mantida entre o sensor do termômetro de radiação infravermelha e o topo da cultura, em todas as medidas;

b) a alta associação entre as variáveis T_{campo} e a padrão T_{folha} verificada pelos resultados apresentados nas correlações simples e parciais entre essas duas variáveis.

Desse modo, nas condições do trabalho realizado, é proposta a seguinte equação para a estimativa da temperatura de superfície cultivada com trigo usando dados NOAA-14/AVHRR:

$$T_{\text{campo}} = (-3,9 \times 10^{-2}) NC_{\text{canal4}} + (-7,1 \times 10^{-2}) NC_{\text{canal5}} + 327,18. \quad (4.1)$$

*“Sei que canto. E a canção é tudo.
Tem sangue eterno a asa ritmada.
E um dia sei que estarei mudo:
- mais nada.”*

*Cecília Meireles
Motivo*

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

A) A temperatura de superfície calculada a partir das imagens obtidas e corrigidas atmosféricamente pelo método *split window* são representativas da realidade terrestre. Esta conclusão foi obtida baseando-se nas correlações entre $T_{split\ window}$ e T_{campo} .

B) Os ângulos de visada para os quais as imagens foram obtidas, não causaram efeitos de distorção significativos tanto nos valores de nível de cinza quanto nos valores brutos e corrigidos de temperatura de superfície. Esta conclusão foi obtida baseando-se nos resultados das correlações entre os valores dos ângulos de visada de cada imagem e os respectivos valores de nível de cinza, das temperaturas brutas obtidas para cada canal e das temperaturas corrigidas, combinadas pelo método *split window*.

C) A distância de 1,0 m mantida entre o sensor do termômetro de radiação infravermelha e o topo da cultura no campo, não foi suficiente para que fossem observados efeitos de absorção atmosférica da radiação emitida pelas plantas. Desse modo, os valores observados de T_{campo} foram considerados isentos desse efeito, o que possibilitou o seu uso na obtenção da equação proposta para a estimativa da temperatura de superfície cultivada com trigo, usando dados NOAA-14/AVHRR, nas condições do trabalho realizado.

D) A boa correlação dos valores do padrão T_{folha} com os de T_{abrigo} levam a inferir a respeito da boa qualidade das medidas de T_{campo} . Esta conclusão é obtida baseando-se na também boa correlação encontrada entre os valores de T_{abrigo} e T_{campo} e desta com T_{folha} .

E) A influência da velocidade do vento nas medidas de temperatura de superfície feitas no campo foi considerada como não-significativa. Uma provável causa para esse resultado é o fato de as medidas de V_{vento} terem sido feitas em horário não-simultâneo às medidas de T_{campo} .

F) A não-influência de $U_{absoluta}$ nos valores observados de $T_{split\ window}$ pode estar mostrando a eficiência da equação de *split window* usada na correção atmosférica dos dados orbitais brutos de temperatura de superfície. Essa equação é apresentada como:

$$T_{split\ window} = 0,52 \cdot T_4^2 + 0,52 \cdot T_5^2 - 1,04 \cdot T_4 \cdot T_5 + 2,17 \cdot T_4 - 1,17 \cdot T_5 + 1,16$$

e, reescrita, fica:

$$T_{split\ window} = T_4 + [1,17 + 0,52 \cdot (T_4 - T_5)] \cdot (T_4 - T_5) + 1,16.$$

Onde:

$T_{split\ window}$ = Temperatura de superfície (K) corrigida pelo método *split window*;

T_4 = Temperatura de superfície (K) obtida do canal 4 do sensor;

T_5 = Temperatura de superfície (K) obtida do canal 5 do sensor.

6. ANEXOS

ANEXO 1 - DADOS EXPERIMENTAIS

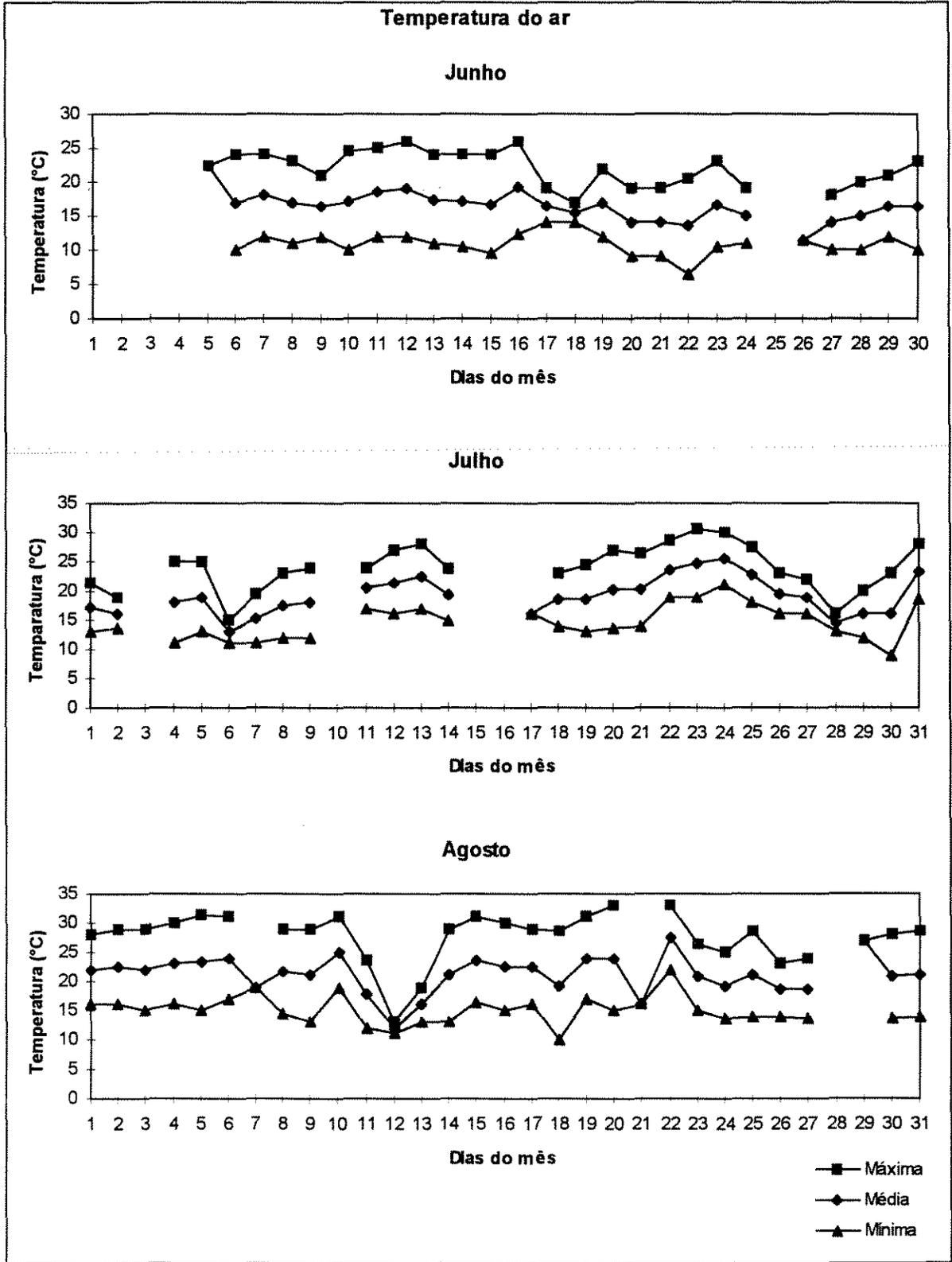


Figura 6.1. Dados coletados nos meses de junho, julho e agosto, pelo termógrafo instalado em abrigo meteorológico.

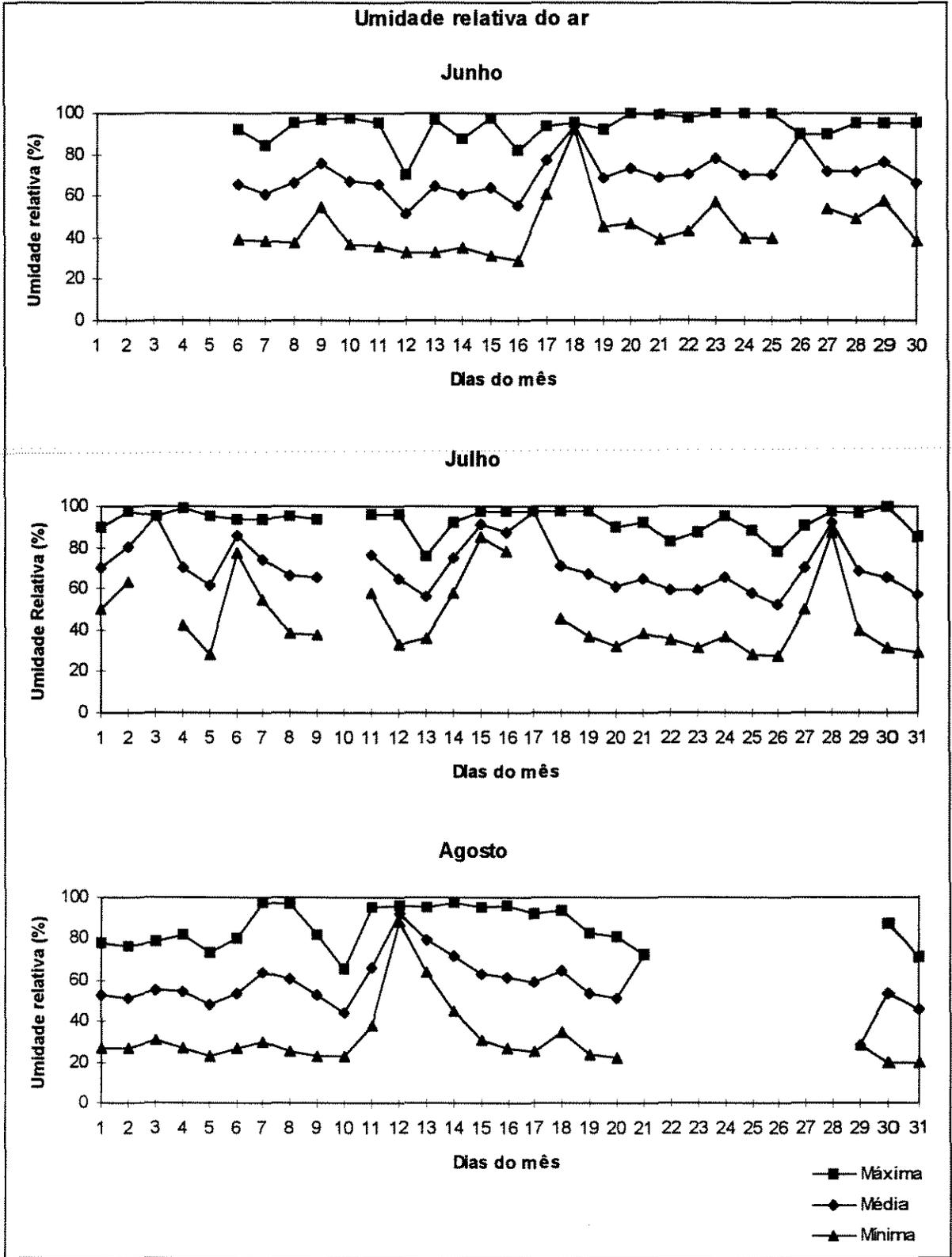


Figura 6.2. Dados coletados nos meses de junho, julho e agosto, pelo higrógrafo instalado em abrigo meteorológico.

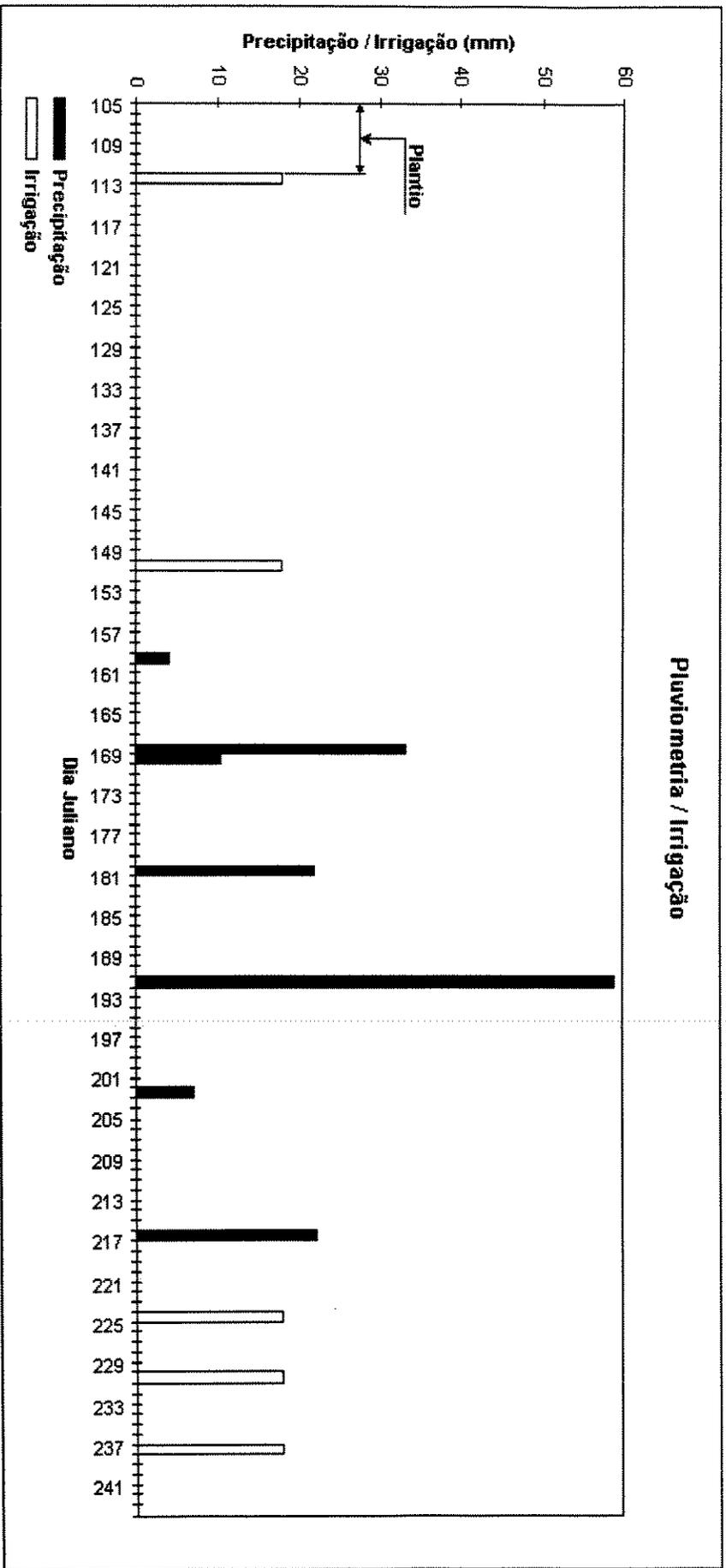


Figura 6.3. Dados de precipitação coletados pelo pluviômetro instalado em local próximo ao abrigo meteorológico e dados de irrigação.

ANEXO 2 - DADOS DE CALIBRAÇÃO E DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO

Tabela 6.1. Coeficientes de correção do valor de R_{lin} , específicos para cada um dos canais infravermelhos do sensor AVHRR.

	Canal 3	Canal 4	Canal 5
Coeficiente A	1,00359	0,92378	0,96194
Coeficiente B	0	0,0003822	0,0001742
Coeficiente C	-0,0031	3.72	2,00

Tabela 6.2. Termos representativos das características da atmosfera existente entre a superfície e o sensor do satélite, determinados para quatro modelos atmosféricos.

Modelo Atmosférico	a_0	a_1	a_2	b_{04}	b_{14}	b_{05}	b_{15}
Tropical	2,49	4,33	-5,16	0,08	-0,11	0,03	-0,08
Lat. media - Verão	2,13	3,18	-7,49	0,22	-0,51	0,06	-0,26
Lat. media - Inverno	1,71	1,30	-9,10	0,41	-1,34	0,22	-1,56
USA -76	1,57	0,76	-9,08	0,45	-1,59	0,26	-1,59

Tabela 6.3. Resultados das análises de regressão linear simples entre os parâmetros medidos e estimados.

X	Y	a	b	R	R ²	Significância de F	
T _{abrigo}	T _{psicrômetro}	1,898782	0,941061	0,89	0,80	0,04	*
U _{absoluta}	T _{campo}	254,0568	3,002029	0,77	0,59	0,13	*
V _{vento}	T _{campo}	285,4073	0,05209	0,56	0,32	0,09	n.s.
U _{relativa}	T _{folha}	44,62357	-0,32286	0,92	0,84	1,91E-04	**
U _{absoluta}	T _{split window}	243,8979	4,196138	0,83	0,69	0,08	n.s.
A _{visada}	T _{split window}	298,057	-0,9057	0,24	0,06	0,64	n.s.
U _{absoluta}	T _{canal4}	256,7633	2,871416	0,70	0,50	0,19	n.s.
U _{absoluta}	T _{canal5}	264,0417	2,215026	0,61	0,37	0,28	n.s.
A _{visada}	NC _{canal4}	270,6334	13,75154	0,51	0,26	0,30	n.s.
A _{visada}	NC _{canal5}	287,117	9,920256	0,40	0,16	0,43	n.s.
A _{visada}	T _{canal4}	296,7536	-1,18609	0,38	0,15	0,45	n.s.
A _{visada}	T _{canal5}	296,7068	-1,27541	0,46	0,21	0,35	n.s.

A _{visada}	Ângulo de visada (°) do sensor AVHRR no momento da passagem.
NC _{canal4}	Nível de cinza do <i>pixel</i> de trabalho - canal 4.
NC _{canal5}	Nível de cinza do <i>pixel</i> de trabalho - canal 5.
T _{abrigo}	Temperatura do ar (°C) medida por termógrafo, em abrigo meteorológico.
T _{campo}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida no campo.
T _{canal4}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 4 do sensor.
T _{canal5}	Temperatura radiativa de superfície (K) medida pelo canal 5 do sensor.
T _{folha}	Temperatura da folha (°C) medida por termopar de contato.
T _{psicrômetro}	Temperatura do ar (°C) medida com psicrômetro de aspiração.
T _{split window}	Temperatura radiativa de superfície (K) corrigida pelo método <i>split window</i> .
U _{absoluta}	Umidade absoluta do ar (g/m ³).
U _{relativa}	Umidade relativa do ar (%).
V _{vento}	Velocidade do vento (m/min).
*	Significativo ao nível de 5%.
**	Altamente significativo ao nível de 5%.
n.s.	Não-significativo ao nível de 5%.

Tabela 6.4. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e $T_{psicrômetro}$.

Observação	Y ajustado (°C)	Resíduo (°C)
1	11,78	0,82
2	20,25	5,35
3	28,25	-2,85
4	15,07	-4,27
5	28,25	0,95

Tabela 6.5. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	281,45	0,85
2	290,40	4,88
3	298,85	-3,17
4	284,93	-4,03
5	298,85	1,46

Tabela 6.6. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	286,54	-4,24
2	299,03	-3,74
3	295,70	-0,02
4	282,36	-1,46
5	290,86	9,46

Tabela 6.7. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e T_{folha} .

Observação	Y ajustado (°C)	Resíduo (°C)
1	11,51	0,56
2	21,44	5,06
3	30,81	-1,81
4	15,37	-3,77
5	30,81	-0,04

Tabela 6.8. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{abrigo} e $T_{split\ window}$.

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	282,93	0,87
2	294,74	6,76
3	305,89	-1,80
4	287,52	-5,19
5	305,89	-0,64

Tabela 6.9. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $U_{absoluta}$ e $T_{split\ window}$.

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	289,31	-5,51
2	306,76	-5,26
3	302,11	1,98
4	283,47	-1,13
5	295,34	9,91

Tabela 6.10. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre U_{absoluta} e T_{canal4} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	287,84	-4,58
2	299,78	-4,94
3	296,60	0,54
4	283,84	-2,12
5	291,96	11,11

Tabela 6.11. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre U_{absoluta} e T_{canal5} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	288,01	-3,90
2	297,22	-4,70
3	294,77	-0,04
4	284,93	-2,57
5	291,19	11,21

Tabela 6.12. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e $T_{\text{split window}}$.

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	289,97	-10,50
2	291,64	-7,84
3	290,17	11,33
4	292,13	11,96
5	295,51	-13,17
6	297,03	8,22

Tabela 6.13. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $T_{\text{split window}}$ e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	278,99	0,27
2	282,24	0,07
3	295,54	-0,26
4	297,49	-1,81
5	281,14	-0,23
6	298,36	1,96

Tabela 6.14. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{campo} e T_{folha} .

Observação	Y ajustado (°C)	Resíduo (°C)
1	9,87	0,47
2	13,06	-0,99
3	26,68	-0,18
4	27,10	1,90
5	11,59	0,01
6	31,97	-1,20

Tabela 6.15. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre $T_{\text{split window}}$ e T_{folha} .

Observação	Y ajustado (°C)	Resíduo (°C)
1	9,44	0,89
2	12,90	-0,83
3	27,04	-0,54
4	29,12	-0,12
5	11,73	-0,13
6	30,04	0,73

Tabela 6.16. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{canal4} e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	278,77	0,49
2	282,93	-0,63
3	293,61	1,67
4	295,73	-0,04
5	281,51	-0,61
6	301,20	-0,88

Tabela 6.17. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre T_{canal5} e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	278,80	0,46
2	283,78	-1,47
3	292,30	2,98
4	294,55	1,13
5	282,00	-1,10
6	302,33	-2,01

Tabela 6.18. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e NC_{canal4} .

Observação	Y ajustado	Resíduo
1	393,36	66,64
2	368,07	43,93
3	390,38	-70,38
4	360,63	-72,63
5	309,31	86,69
6	286,25	-54,25

Tabela 6.19. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e NC_{canal5} .

Observação	Y ajustado	Resíduo
1	375,65	56,35
2	357,41	26,59
3	373,50	-53,50
4	352,04	-68,04
5	315,02	104,98
6	298,38	-66,38

Tabela 6.20. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e T_{canal4} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	286,17	-7,42
2	288,35	-5,09
3	286,43	8,41
4	288,99	8,14
5	293,42	-11,70
6	295,41	7,66

Tabela 6.21. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre A_{visada} e T_{canal5} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	285,32	-6,12
2	287,67	-3,56
3	285,60	6,92
4	288,36	6,37
5	293,12	-10,76
6	295,26	7,14

Tabela 6.22. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre V_{vento} e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	286,98	-4,67
2	295,73	-0,45
3	290,56	5,12
4	286,45	-5,54
5	293,05	7,27
6	286,02	13,75
7	299,78	-0,58
8	289,11	-1,59
9	292,30	-8,13
10	285,86	-5,18

Tabela 6.23. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre U_{relativa} e T_{folha} .

Observação	Y ajustado (°C)	Resíduo (°C)
1	13,04	-0,97
2	24,31	2,19
3	25,60	3,40
4	13,82	-2,22
5	30,99	-0,23
6	28,11	-5,05
7	23,52	1,06
8	13,65	5,75
9	13,03	-2,10
10	13,09	-1,83

Tabela 6.24. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre NC_{canal4} , NC_{canal5} e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	278,57	0,69
2	283,85	-1,54
3	291,98	3,30
4	295,78	-0,10
5	281,91	-1,01
6	301,66	-1,34

Tabela 6.25. Valores de Y e resíduos calculados no ajuste entre V_{vento} , T_{folha} , $T_{\text{psicrômetro}}$ e T_{campo} .

Observação	Y ajustado (K)	Resíduo (K)
1	281,77	0,53
2	294,74	0,55
3	296,12	-0,43
4	283,07	-2,17
5	303,58	-3,26
6	295,84	3,92
7	298,38	0,83
8	286,73	0,78
9	283,22	0,95
10	282,38	-1,70

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROMARKET CONSULTORIA SÓCIO-ECONÔMICA LTDA. Trigo alcança melhor cotação desde 1988. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 4 de out. de 1995. Suplemento agrícola, p. G5.
- AGROMARKET CONSULTORIA SÓCIO-ECONÔMICA LTDA. Triticulor recebeu bons preços em 95. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 10 de nov. de 1995a. Suplemento agrícola, p. G5.
- AGROMARKET CONSULTORIA SÓCIO-ECONÔMICA LTDA. Área com trigo aumentará 57%. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 22 de mai. de 1996. Suplemento agrícola, p. G5.
- ALLISON, L. J. & SCHNAPF, A. Meteorological Satellites. In : Cowell N. R.; Simonett, S.D.; Ulaby, F. T. **Manual of Remote Sensing**. 2. ed. Falls Church, Virginia, USA : American Society of Photogrammetry, 1983. vol. I, p. 651-679.
- ASSAD, E. D. **Sensoriamento remoto e agrometeorologia: possibilidades de aplicação dos satélites meteorológicos na agricultura**. Brasília, D.F. : EMBRAPA - CPAC, s/d. 58 p. (Apostila).
- BAEZA, E. L. Climatología de la superficie de la tierra. In : **La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación**. Valéncia, España : Facultat de Física, Universitat de Valéncia, 1993. p. 55-82.
- BASTIAANSSEM, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. Wageningen, Holanda : Wageningen Agricultural University, 1995. 273 p. Tese. (Doutorado).
- BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de Déficit Hídrico em Culturas. In : Bergamaschi, H. **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRS, 1992. p. 25-32.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa : UFV, Impr. Univ. , 1987. 488 p.

- CABALLERO, E. M. R. **influência de la Radiancia Atmosférica Descendente en las Medidas de Emissividad y Temperatura de la Superficie del Suelo.** València, España : Facultat de Física. Universitat de València, 1994. 114 p. Tese. (Doutorado).
- CAMPBELL, G. S. **An Introduction to Environmental Biophysics.** New York, USA : Springer-Verlag New York Inc., 1977. 160 p.
- CHAHINE, M. T.; McCLEESE, D.J.; ROSENKRANZ, P.W.; STAELIN, D.H. Interaction Mechanisms Whithin The Atmosphere. In : Cowell N. R.; Simonett, S.D.; Ulaby, F. T. **Manual of Remote Sensing.** 2.ed. Falls Church, Virginia, USA : American Society of Photogrammetry, 1983. vol. I, p.165-230.
- COLL, C.; CASELLES, V. & SOBRINO, J.A. La Corrección Atmosférica en el espectro térmico. In: Gandia, S. & Meliá, J. **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura. Curso de postgrado.** València, España : Universitat de València, 1991. p. 149-182.
- COLL, C.; CASELLES, V. & VALOR, E. Atmospheric correction and determination of sea surface temperature in midlatitudes from NOAA-AVHRR data. **Atm. Res.**, 30. p. 233-250, 1993.
- CRACKNELL, A.P. & HAYES, L.W.B. **Introduction to Remote Sensing.** London, United Kingdon : Taylor & Francis Ltda. , 1991. 294 p.
- EHRlich, D. ; ESTES, J. E. ; SINGH, A. Application of NOAA - AVHRR 1 km data for environmental monitoring. **Int. J. Rem. Sens.**, v. 15, n.1, p. 145-161, 1994.
- FERNANDES, D. P. de L. Aspectos econômicos e estatísticos do trigo no Brasil. **Inf. Agropec.**, v. 9, n. 97, p. 3-9, 1983.
- FGV - Fundação Getúlio Vargas. **Agroanalysis.** Rio de Janeiro : Instituto de Economia, Centro de Estudos Agrícolas, v. 12, n. 9, p. 22, 1988.
- FIGUEIRÊDO, D.C. **Sistema de obtenção de índice de vegetação para a América do Sul por processamento digital de imagens NOAA/AVHRR.** São José dos Campos : INPE, 1989. 84 p. Dissertação (Mestrado).

- FONTANA, D. C. Determinação da evapotranspiração. In: Bergamaschi, H. **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre : Ed. Universidade, UFRS, 1992. p. 48-62.
- FRANCA, G. B. & CRACKNELL, A. P. **Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11/AVHRR data. North-eastern Brasil**. Fortaleza : UFC, s/d. 31p.
- GARCIA, M.J.L. & CASELLES, V. Introduccion a la teledetección In : Gandia, S. & Meliá, J. **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado**. València, España : Universitat de València, 1991. p.19-49.
- GSC - General Sciences Corporation. **METPRO - Workstation User's Guide. Version 3.1**. Laurel, Maryland, USA : GSC, 1994. 288 p.
- GUYOT, G. **Signatures Spectrales des Surfaces Naturelles**. Collection Télédétection Satellitaire. Caen, France : Paradigme, 1989. vol. 5, 178 p.
- GUYOT, G. & SEGUIN, B. Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie. **Agronomie**. n. 8 (1), p. 1-13, 1988.
- HUBAND, N.D.S. & MONTEITH, J.L. Radiative surface temperatura and energy balance of a wheat canopy. I. Comparison of radiative and aerodynamic canopy temperature. **Boundary - Layer Meteorology**, n. 36, p. 1-17, 1986.
- ISRAELSEN, O.W. & HANSEN, V.E. **Irrigation Principles and Pratices**. 3a. ed. New York : Ed. Jonh Wiley & Sons Inc., 1962. 447 p.
- JANUÁRIO, M. **Balanços Hídrico e de Energia e a Resposta Fisiológica para a Cultura do Trigo (*Triticum aestivum* L.)**. Piracicaba : Usp - Esalq, 1992. 104 p. Dissertação (Mestrado).
- KIDWELL, K. B. **NOAA polar orbiter data. Users Guide**. Washington, D.C., USA : NOAA / NESDIS / OSDPD, 1995. 287 p.
- LENOBLE, J. **Atmospheric Radiative Transfer**. Hampton, Virginia, USA : A. Deepak Publishing, 1993. 532 p.

- MATZENAUER, R. Evapotranspiração de Plantas Cultivadas e Coeficientes de Culturas. IN: Bergamaschi, H. **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre : Ed. Universidade, UFRS, 1992. p. 33-47.
- MEDEIROS, V.M.; Tanaka, K.; Yamazaki, Y. Sistema de Navegação dos Dados AVHRR dos Satélites da Série NOAA. In: Simpósio Latino Americano de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 10-15 ago.1986. **Anais**. São José dos Campos : INPE, 1986. p. 464-471.
- MIRALLES, J. M. Fundamentos físicos de la teledetección: leyes e principios básicos In : Gandia, S. & Meliá, J. **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado**. València, España : Universitat de València, 1991. p. 50-83.
- MOTA, F.S. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo : Nobel, 1981. 376 p.
- NING, C.H.S.; TANAKA, K.; CABRAL, R.M.; YAMAZAKI, Y.; NAKAMURA, Y. **Processamento dos Dados HRPT dos Satélites da Série NOAA**. São José dos Campos : INPE, 1987. 19 p.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto Princípio e Aplicações**. São Paulo : Ed. Edgard Blücher Ltda., 1992. 308 p.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo : Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440 p.
- OTTLÉ, C. & VIDAL-MADJAR, D. Estimation of land surface temperature with NOAA-9 data. **Rem. Sens. Env.**, n. 40, p. 27-41, 1992.
- PEREIRA, A. R. **Apostila da disciplina LFM704-Evapo(transpi)ração - Curso de Pós-graduação em agrometeorologia da Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba : ESALQ - USP, 1992.
- PESSOA, N. da S. **Balanço Hídrico**. Campinas : CATI, 1985. Bol. Tec. 190. 32p.
- RAMOS, A. B. ; OLALLA, F. M. de S. ; CASELLES, V. Maximum and actual evapotranspiration for barley and mayze through NOAA satellite images in la Mancha Region, Spain. In : **INTERNATIONAL CONGRESS OF AGRICULTURAL ENGINEERING**. Milão, Itália : 1994. 9 p. (Report nº 94 - A - 012).

- REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-planta-atmosfera**. 4a. ed. Campinas : Fundação Cargil, 1985. 448 p.
- SCHANDA, E. **Physical Fundamentals of Remote Sensing**. Berlin, Germany Springer-Verlag, 1986. 187 p.
- SEGARRA, D. Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes. In : Gandia, S. & Meliá, J. **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado**. València, España : Universitat de València, 1991. p. 217-240.
- SEGUIN, B., Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'infrarouge thermique. In : **Proc. 2nd Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing**. Bordeaux, França : 1984. 939 p. (Les Colloques de l'I.N.R.A. N° 23, p. 427-446).
- SILVA, L. F. Radiation and Instrumentation in Remote Sensing. In: **Remote Sensing :The Quantitative Approach**. USA : McGraw-Hill Inc., 1978. p. 23-135.
- SLATER, P.N. **Remote Sensing. Optics and Optical Systems**. Reading, Massachusetts, USA : Addison-Wesley Publishing Company, 1980. 575p.
- SMITH, J.A. Matter-Energy Interaction in the Optical Region. In : Cowell N. R.; Simonett, S.D.; Ulaby, F. T. **Manual of Remote Sensing**. 2.ed. Falls Church, Virginia, USA : American Society of Photogrammetry, 1983. vol. I, p. 61-113.
- SOBRINHO, J. S. & SOUZA, M. A. de. Origem, descrição botânica e desenvolvimento do trigo. **Inf. Agrop.**, v. 9, n. 97, p. 9-13, 1983.
- SOBRINO, J. A. & CASELLES, V. A methodology for obtaining the crop temperature from NOAA-9 AVHRR data. **Int. J. Rem. Sens.**, v.12, n. 12, p. 2461-2475, 1991.
- SOBRINO, J. A.; CASELLES, V. & COLL, C. La Corrección de Emissividad en el Espectro Térmico. In : Gandia, S. & Meliá, J. **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado**. València, España : Universitat de València, 1991. p. 95-139.

SOBRINO, J. A.; COLL, C. & CASELLES, V. La medida de la temperatura desde satélites. In : **La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación.** València, España : Facultat de Física, Universitat de València, 1993. p.153-181.

TOMASINI, R. G. A. Evolução histórica e aspectos econômicos. In : OSÓRIO, E. A. (coord.). **Trigo no Brasil.** Campinas : Fundação Cargill, 1982. cap. 1, p. 3-26.

VIANELLO, R. L. & Alves, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa : UFV, Impr. Univ., 1991. 449 p.

VIEIRA, D. B. Relação Água, Solo e Planta. In: **Programa Nacional de Irrigação. Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação.** Brasília : PNI/Fundação CHT, 1986. p. T3.1-T3.101.

WHITHERS, B. & VIPOND, S. **Irrigação Projeto e Prática.** Trad. Francisco da Costa Verdade. São Paulo : EPU - Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. 339 p.

ABSTRACT

The Surface temperature (Ts) estimate can be applied to the agroclimatological parameter analysis, useful to evaluate evapotranspiration, soil moisture, and irrigation scheduling. AVHRR works with five imaging channels. Two of them, the channels 4 and 5, receive terrestrial electromagnetic energy on the infrared range of the spectrum, useful to vegetated surface temperature studies. Diurnal and nocturnal image series are being used in this work. These images were provided by the AVHRR aboard the NOAA-14 satellite. The images were processed on suitable software to the treatment of NOAA-AVHRR products, for Ts final value obtaining. The processing work includes both the images geo-referencing and their atmospheric correction applying the "split window method". A terrestrial radiometer was used to the Ts measurements carried out *in situ*, during the satellite passes. The corrected Ts satellite data were submitted to a regression analysis against the terrestrial data about the same parameter. High association level between Ts measured at the field and both the leaf temperature and the near surface air temperature was observed. The high correlation between Ts measured at the field and that one from the images shown that the split window equation corrected satisfactorily the atmosphere effects over the images. An equation to estimate wheat surface temperature from NOAA14/AVHRR data was presented for the experiment field conditions.