

ISSN 0104-1347

Estimativa da emissividade da superfície como subsídio para a determinação da temperatura do dossel da cana-de-açúcar

Estimate of the surface emissivity in order to determine the sugarcane canopy surface temperature

Carlos Alberto Soares de Almeida¹, Hilton Silveira Pinto², Jurandir Zullo Júnior³,
Giampaolo Queiroz Pellegrino⁴.

Resumo: Entre outubro de 1996 e agosto de 1999 foram realizadas, numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), situada no Município de Guariba, SP, quatro campanhas para medições da temperatura radiativa da superfície no campo. Esses valores foram correlacionados a valores de temperatura de superfície obtidos a partir de imagens captadas pelos sensores AVHRR a bordo do satélite NOAA-14, corrigidos devido ao efeito atmosférico e de emissividade. Essa correção foi feita por uma equação *split-window* atualizada, que considerou a emissividade da superfície cultivada, estimada diretamente no campo. A alta correlação entre a temperatura de superfície medida no campo e a obtida a partir dos dados orbitais indicou que a equação de *split-window* usada corrigiu satisfatoriamente esses dados quanto aos efeitos atmosféricos e de emissividade. Foi proposta, uma adaptação do método da caixa para estimativa de emissividade de uma superfície cultivada com cana-de-açúcar. Os dados obtidos por esse método foram comparados àqueles obtidos por um método alternativo de estimativa baseado na proporção de cobertura vegetal e solo descoberto, também aqui proposto. Foi verificado que os dois métodos apresentaram resultados satisfatórios e equivalentes quanto à estimativa de emissividade da superfície como subsídio para a determinação da temperatura de superfície do dossel de cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: emissividade; “método da caixa”; temperatura de superfície; sensoriamento remoto; cana-de-açúcar;

Abstract: Near the city of Guariba, SP, between October of 1996 and August of 1999, four campaigns were carried out to measure the radiative surface temperature in a cultivated area with sugarcane (*Saccharum spp.*). These results were related to radiative temperature values, which were obtained from some images of AVHRR sensor, on board of the satellite NOAA-14, and were corrected due to atmospheric and emissivity effects. This correction was made using an updated split-window equation, which considered the emissivity of the canopy, estimated directly from the field. The high correlation between the surface temperature of the cultivated area and those which was achieved from the orbital data indicated that the split-window equation could correct well these results considering both the atmospheric and the emissivity effects. An adaptation of the box method was proposed to estimate the emissivity of a sugarcane canopy. These results were also compared to those obtained by an alternative method based on the crop covering and bared soil proportion. The conclusion was that both methods brought satisfactory and equivalent results concerning the surface emissivity in order to determine the sugarcane canopy surface temperature.

Keywords: emissivity; “box method”; surface temperature; remote sensing; sugarcane.

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, São Paulo, SP. E-mail: profe.carlos@uol.com.br

² Engenheiro Agrônomo, Professor Doutor, Cepagri/Unicamp, Campinas, SP

³ Engenheiro, Professor Doutor, Pesquisador, Cepagri/Unicamp, Campinas, SP

⁴ Engenheiro Florestal, Doutor em Engenharia Agrícola, Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP

Introdução

Os modelos teóricos destinados à análise e à caracterização de extensas áreas de superfície terrestre imageadas por satélites carecem fundamentalmente de medidas *in situ* de parâmetros como a emissividade. Nas duas últimas décadas, vários esforços têm sido feitos na obtenção de medidas cada vez mais precisas de temperatura da superfície em escala regional. Desse modo, tem-se buscado aperfeiçoar os algoritmos disponíveis em cada etapa do processamento digital de imagens orbitais. Nesse processamento, vários obstáculos ao aproveitamento dos dados disponíveis têm sido ultrapassados. Dentre esses obstáculos, um dos que tem merecido uma atenção maior dos pesquisadores é a determinação de valores médios de emissividade para a correção devida também ao efeito introduzido pela variabilidade espectral desse parâmetro, como pode ser observado nos trabalhos realizados por RUBIO (1994), VALOR & CASELLES (1996) e RUBIO et al. (1997). Para a obtenção de tais medidas, devem ser considerados métodos de aplicação simples, rápidos e que sejam adequados às condições de trabalho no campo.

A energia emitida por uma superfície tem as suas características modificadas por componentes do meio atmosférico, tais como o vapor d'água e o dióxido de carbono. Essas perturbações podem ocorrer de duas formas: pelo espalhamento e pela absorção da radiação, conforme afirma MIRALLES (1991). Devido a esses fenômenos, a energia que chega ao sensor de um satélite não é representativa da realidade terrestre. Os sensores térmicos orbitais operam nas "janelas atmosféricas" situadas nas regiões espectrais de 3,5-4,1 μm e 10,5-12,5 μm . Essas regiões são assim denominadas por apresentarem máxima transparência atmosférica. Entretanto, inclusive dentro dessas janelas, os efeitos devido aos gases atmosféricos são significativos. Esses gases absorvem parte da radiação emitida pela superfície terrestre e, por outro lado, emitem radiação térmica em direção ao satélite, em função da temperatura em que se encontra a atmosfera. Segundo COLL (1994), como geralmente a temperatura dos gases na atmosfera é menor que a da superfície terrestre, o efeito atmosférico global representa uma diminuição da radiação recebida por um sensor. A magnitude dessa diminuição depende basicamente do conteúdo de vapor d'água e da temperatura da

atmosfera. O efeito da emissividade da superfície é superposto à atenuação atmosférica no caso da temperatura da superfície terrestre. Ao contrário da superfície do mar, a emissão termal da superfície terrestre é altamente variável, pois depende de um número muito grande de fatores relacionados à sua composição física (proporção e tipo de cobertura vegetal, tipo de solo aparente e geometria da superfície, entre outros) caracterizando a variabilidade espacial desse parâmetro. CASELLES & SOBRINO (1989) avaliaram a importância da precisão nas medidas de emissividade, encontrando que a incerteza de 1% na determinação desse parâmetro leva a um erro de 0,5°C para um valor de temperatura do solo em torno de 27°C (300K). Desse modo, torna-se importante a determinação precisa de valores de emissividade para a superfície cuja temperatura se deseja medir. Pode-se proceder a essa determinação através de medições experimentais de emissividade feitas no campo.

Para a medição de emissividade (ϵ) a ser feita no campo, RUBIO et al. (1997) indicam o método denominado de "método da caixa", originalmente proposto por BUETNER & KERR (1965). A caixa utilizada por esses autores possui as dimensões de 0,8m de altura por 0,3m x 0,3m de base livre, ou seja, sem fundo. Cada lado da caixa deve ser confeccionado com um material que possua as mesmas propriedades físicas de uma superfície refletiva lambertiana, com valor de emissividade próximo de zero. No topo da caixa são usadas tampas móveis, chamadas de "tampa quente" e "tampa fria", com diferentes respostas espectrais. As medições de podem ser feitas por duas variações do "método da caixa": pelo "método de duas tampas", no qual se utiliza tanto a tampa fria como a tampa quente; e pelo "método de uma tampa", no qual somente a tampa fria é utilizada. O método de uma tampa foi aqui utilizado devido à sua maior simplicidade, considerando as características da cultura a ser trabalhada, a cana-de-açúcar. Independentemente do método utilizado, o valor de ϵ e médio obtido poderá ser utilizado pelo método de correção dos efeitos atmosféricos e de emissividade.

Uma solução para o problema da correção dos efeitos atmosféricos e de emissividade no termal consiste na utilização de várias medidas de radiação de um mesmo *pixel*. Isto é possível com os canais 4 e 5 dos sensores AVHRR. Dentro da janela 10,5 μm

12,5 μ m, o espectro de absorção do vapor d'água é mais expressivo para longos comprimentos de onda, devido à maior contribuição da absorção do tipo contínuo. Por isso, a atenuação atmosférica resultante no canal 5 é maior que a absorção diferencial com respeito ao canal 4, sendo então uma medida do conteúdo de vapor d'água atmosférico. Dessa forma, a correção atmosférica em um canal pode ser determinada a partir da diferença entre as temperaturas medidas pelos canais 4 e 5, $T_4 - T_5$. Esta é a base física do modelo *split-window*, assim denominado por utilizar os dois canais mencionados dentro da janela atmosférica, além de considerar a emissividade da superfície em estudo (COLL, 1994). ALMEIDA (1996) procedeu à correção atmosférica e de emissividade de imagens termais de uma área cultivada com trigo. Para tanto combinou valores de temperatura T(RAD) obtidos pelas bandas 4 e 5 do sensor AVHRR, aplicando-os a uma equação *split-window* que assume para ϵ o valor de 0,98. Esse valor, de acordo com RUBIO (1994), representa um valor genérico de emissividade para superfícies vegetadas. Assim, por não considerar um valor ϵ estimado no campo, esse método é aqui denominado "método *split-window* antigo".

Tem-se, então, como principais objetivos deste trabalho: A) desenvolver, testar e comprovar a eficiência de uma adaptação, para a cana-de-açúcar, do "método da caixa" para a estimativa da emissividade da vegetação. B) testar e comprovar a eficiência de um método alternativo ao "método da caixa adaptado" para a estimativa da emissividade de uma superfície cultivada com cana-de-açúcar a partir de dados coletados no campo; C) testar e comprovar a eficiência de uma equação *split-window* para a correção atmosférica de dados orbitais de temperatura de superfície, na qual sejam considerados dados médios de emissividade estimada de uma determinada superfície cultivada, podendo esses dados de estimativa servirem como subsídio a estudos de emissividade usando dados NOAA-AVHRR.

Material e Métodos

Campo experimental

Uma área total de 694,41ha, cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp., variedade RB83-5486), em Latossolo-roxo, foi selecionada na fazenda

São Bento Velho, de propriedade da Usina São Martinho, no Município de Guariba, SP. Dentro dessa área, foram escolhidas cinco parcelas, de acordo com os critérios de relevo plano, uniformidade de cultivo, fácil acesso e distribuição uniforme. Foram realizadas quatro campanhas para coleta de dados entre outubro de 1996 e agosto de 1999.

As medições da temperatura radiativa da superfície no campo

A medição da temperatura radiativa da superfície feita no campo (T_{campo}) foi realizada com o teletermômetro fabricado pela EVEREST INTERSCIENCE INC., modelo 112.2L (*Natural Environment Infrared Thermometer*), que opera na banda espectral de 8,0m a 14,0mm. Os dados de T_{campo} foram coletados em nove repetições por parcela. Dessas, as três primeiras repetições foram feitas dez minutos antes do horário previsto para a passagem do satélite NOAA-14/AVHRR; as três intermediárias, no horário da passagem; e as três últimas, dez minutos depois da passagem do satélite. Esses valores de T_{campo} foram correlacionados aos valores de temperatura do ar (T_{ar}) medidos por um termômetro de mercúrio, e considerados como referência. Esses valores também foram comparados por um teste "t" de médias, buscando a comprovação de que T_{campo} é representativa da realidade terrestre. Os valores de T_{campo} foram então correlacionados aos valores de temperatura de superfície obtidos a partir dos dados fornecidos pelas imagens correspondentes às passagens que ocorreram simultaneamente a essas medições. Esses valores, corrigidos quanto aos efeitos atmosféricos e de emissividade, foram obtidos conforme metodologia detalhada a seguir.

A obtenção do valor de temperatura da superfície a partir das imagens e o método split-window de correção atmosférica e de emissividade

Para cada imagem correspondente às medidas feitas no campo foram obtidos os valores dos níveis digitais produzidos pelos canais 4 e 5 do sensor AVHRR. Os mesmos foram convertidos em valores de temperatura através de um processo de calibração linear. Esse processo utiliza coeficientes denominados de "ganho" e de "intercepto" para cada canal e estão incluídos na base de dados gravada no formato "nível-1b" veiculada em cada

imagem. Desse modo, obtém-se um valor para a radiância medida pelo sensor, conforme demonstrado pela Equação 1:

$$R_{lin} = G \cdot C + I \quad (1)$$

sendo: R_{lin} , a radiância linear medida; G , o coeficiente de ganho; I , o coeficiente de intercepto e C , o número de níveis digitais do *pixel* em operação que, para uma imagem de 10 bits, situa-se no intervalo que vai de 0 a 1023 (KIDWELL, 1995). A Equação 2 foi utilizada para que se chegasse a um valor corrigido de radiância (RAD), função apenas da radiação linear dada pela Equação 2:

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

na qual A_i , B_i e C_i são coeficientes de correção específicos para cada um dos canais infravermelhos do sensor, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes de correção do valor de R_{lin} , específicos para cada um dos canais infravermelhos do sensor AVHRR. (KIDWELL, 1995)

	Canal 4	Canal 5
Coefficiente A	0,92378	0,96194
Coefficiente B	0,0003822	0,0001742
Coefficiente C	3,72	2,00

Uma vez determinados os valores de RAD para os canais 4 e 5, a temperatura foi calculada para cada um destes canais, usando a equação inversa da radiação de Planck (COLL et al., 1991; KIDWELL, 1995):

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

sendo: T , a temperatura (°K); C_1 e C_2 , constantes; e ν , o número central de onda (cm^{-1}) captada dentro da resolução espectral do canal em estudo. Os valores representados por essas variáveis devem ser observados no manual do sensor. Para o presente trabalho foi utilizado o manual escrito por KIDWELL

(1995). Os valores de RAD para cada canal foram usados na equação inversa de Planck (Equação 3) e dessa forma chegou-se a um valor de temperatura $T(\text{RAD})$ para o *pixel* de trabalho em cada uma das bandas. Como a equação 3 leva a um valor subestimado do valor de temperatura de superfície, devido aos efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos e de emissividade, esse valor só pode ser considerado como representativo da realidade terrestre depois de corrigido quanto a esses efeitos. O presente trabalho propõe a aplicação de uma equação *split-window* que considere não um valor genérico de emissividade, como feito por ALMEIDA (1996) em seu método "*split-window* antigo", mas sim um valor estimado a partir de dados medidos diretamente no campo. Por esse motivo esse método é aqui chamado de "*método split-window* atualizado" e tem como um de seus parâmetros de entrada a emissividade estimada a partir de medições da temperatura radiativa segundo duas diferentes metodologias descritas a seguir.

Medições da temperatura radiativa para a estimativa da emissividade da cultura – adaptação do Método de uma tampa para a cana-de-açúcar

A caixa projetada para a adaptação do método de uma tampa à cultura da cana-de-açúcar tinha 1,10m de altura e 0,4m x 0,4m de base, e foi feita em alumínio polido, material que possui as mesmas propriedades físicas de uma superfície reflexiva lambertiana, com valor de emissividade próximo de zero (ϵ do alumínio polido » 0,03), característica essencial à utilização do método. Toda a caixa foi revestida externamente por manta isolante térmica. A Figura 1 é uma representação esquemática dessa caixa, obedecendo às configurações descritas no item 1.2.

O conjunto da caixa é completado por uma tampa e um fundo removíveis, confeccionados no mesmo material da caixa e igualmente revestidos, conforme representado na Figura 1 pelas faces de número 1 e 2, respectivamente. As laterais revestidas pela manta isolante térmica são representadas pelas faces 3 a 6 da Figura 1. No método de uma tampa, foram feitas três medidas de radiância: a primeira delas foi feita com a tampa fria, e consistiu em situar a caixa sobre a amostra com a tampa fria na parte superior da caixa. Esta configuração foi mantida por um período de aproximadamente dois minutos, antes

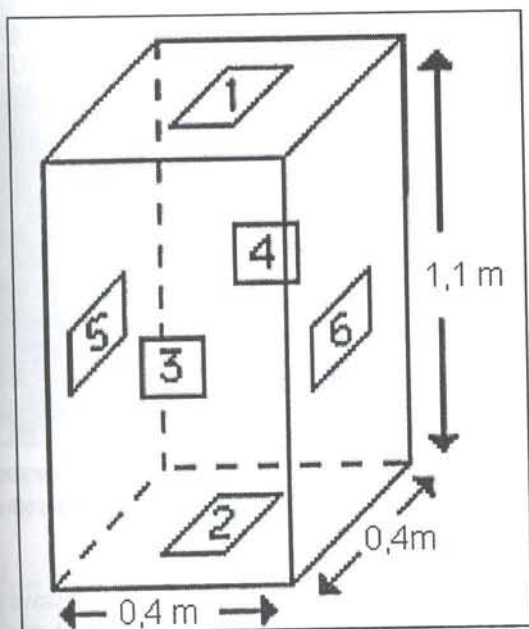


Figura 1. Representação esquemática da caixa utilizada, para adaptação do "método de uma tampa".

de se proceder à medida da radiância, até que um equilíbrio entre as temperaturas dos diferentes materiais componentes do sistema alumínio-amostra fosse atingindo; na segunda, a caixa foi removida e foi medida a radiância da mesma amostra, em ambiente livre; a última consistia de uma medida da radiância atmosférica, emitida em direção à superfície, apontando o sensor do radiômetro para o zênite. As medições da temperatura da cobertura vegetal para a estimativa de emissividade ϵ foram tomadas em quatro campanhas, em cinco repetições por parcela, perfazendo um total de 25 repetições por campanha. Os valores de temperatura radiativa da superfície foram convertidos em radiância com a aplicação da função de Planck:

$$B_i(T) \gg a (T/T_0)^b \quad (4)$$

sendo: $B_i(T)$, a radiância; T a temperatura radiativa medida em cada leitura com a caixa; a e b , dois coeficientes apresentados na Tabela 2, que dependem do intervalo espectral considerado e do intervalo de temperaturas, e T_0 é uma temperatura de referência que neste caso foi considerada como igual a 300K.

A partir desses valores de radiância, foram encontrados valores médios de ϵ medidos no campo, aplicando aqueles valores de radiância na equação 5 proposta por COMBS et al. (1965).

$$\epsilon_0^* = 1 - \frac{L_2 - L_b}{L_2 - L_a^\downarrow} \quad (5)$$

sendo: ϵ_0^* , o valor de emissividade obtido, L_2 é a radiância medida com a tampa fria; L_a^\downarrow é a radiância atmosférica emitida em direção à superfície e L_b é a radiância medida em ambiente livre, ou seja, sem a caixa. À equação 5 também deve ser adicionado um termo para a correção do efeito devido às propriedades físicas do material usado na confecção da caixa. Esse termo é dado pela seguinte equação:

$$\epsilon_a = \epsilon_0^* + \delta\epsilon^* \quad (7)$$

sendo: $\delta\epsilon^*$, o fator de correção que também é dependente da geometria interna do dossel; para o caso de uma superfície totalmente coberta pela vegetação, o valor de $\delta\epsilon^*$ pode ser assumido como igual a 1. Apesar de ser de utilização mais simples que o método de duas tampas, o método de uma tampa apresenta duas restrições com relação à sua aplicação:

Tabela 2. Valores dos coeficientes a e b estimados na banda 8-13mm tendo em conta a função filtro do radiômetro, para três intervalos de temperatura diferentes. Também apresentam-se os erros médio - $E(K)$ - e máximo - $E_{\max}(K)$ - que se produz ao utilizar a aproximação de potência para a função de Planck .

Intervalo de T(K)	a [mW/(m ² sr cm ⁻¹)]	b	E(K)	E _{max} (K)
290-320	95,026	4,7647	0,1	0,22
230-290	99,208	5,5248	0,5	1,1
230-320	95,258	5,28260	1,0	2,4

a) a atmosfera deve apresentar uma distribuição uniforme quanto à presença de nuvens, ou seja, as medidas devem ser feitas em situação de céu totalmente livre ou totalmente coberto por nuvens; e

b) se a superfície amostrada for heterogênea, ou seja, composta por dois ou mais tipos de materiais, o método não pode ser aplicado.

A Figura 2 mostra o teletermômetro infravermelho posicionado no orifício central da tampa que tinha a mesma forma da sessão do termômetro para que este se ajustasse adequadamente ao orifício evitando assim, a passagem da radiação do exterior para dentro da caixa.

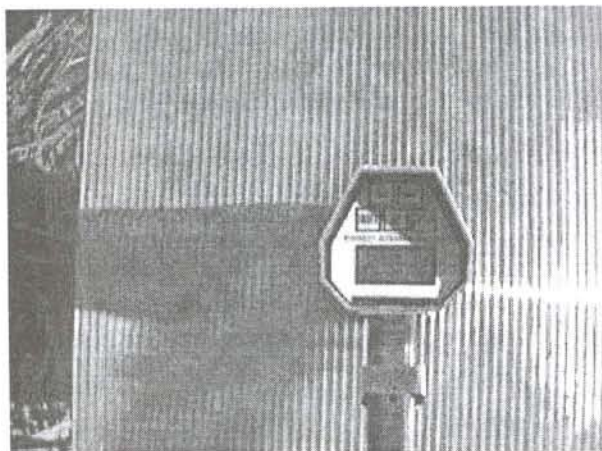


Figura 2. Teletermômetro infravermelho EVEREST posicionado no orifício central da tampa revestida da caixa.



Figura 3. Amostra de cana posicionada dentro da caixa de alumínio polido.



Figura 4. Medição de temperatura radiativa de uma amostra de cana rearranjada no solo sendo feita com a caixa pelo "método de uma tampa".

Quando a altura da vegetação ultrapassava a altura da caixa, uma amostra do topo da cobertura vegetal era coletada e rearranjada no solo, na altura da caixa. Desse modo, a caixa poderia ser posicionada sobre a amostra de modo a contê-la e a medição poderia ser feita normalmente. A Figura 3 apresenta como a amostra de cana era posicionada dentro da caixa e a Figura 4 mostra a medição sendo feita. Esse foi o procedimento para cada amostragem do "método de uma tampa" com a obtenção de três medidas da temperatura radiativa, em cinco repetições por parcela.

Método alternativo das proporções de solo descoberto e de cobertura da vegetação para a estimativa dos valores de emissividade da superfície

Propôs-se ainda um método alternativo ao método de uma tampa, para a estimativa dos valores de emissividade da superfície. Nele, são feitas as medições da proporção do solo descoberto (P_s) e da proporção da cobertura pela vegetação (P_v), com o radiômetro *Plant Canopy Analyzer LI-COR/LAI-2000* que mede a radiação que chega ao topo do dossel e também a que passa por ele e chega ao solo. Pela diferença entre as duas, são calculadas as proporções de vegetação e de solo descoberto. Os valores obtidos a partir dessas medições foram aplicados na equação de estimativa:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + \delta\varepsilon \quad (7)$$

sendo: ε o valor estimado de emissividade da superfície, ε_v , o valor de emissividade típico de

vegetação herbácea verde ($\varepsilon=0,985\pm 0,007$) (RUBIO, 1994), ε_s o valor de emissividade típica de solos siltosos ($\varepsilon_s=0,948\pm 0,005$) (RUBIO, 1994); e de é um fator de correção. A emissividade estimada por cada um dos métodos, foi aplicada à equação *split-window* de correção dos efeitos atmosféricos e de emissividade, conforme se verá a seguir.

Aplicação da equação típica de 'split-window' considerando a emissividade estimada e análise dos resultados obtidos

A equação *split-window* "atualizada" empregada para a correção dos efeitos atmosféricos e de emissividade foi a seguinte:

$$T_{\text{corrs}w2} = T_4 + [1,17 + 0,52 \cdot (T_4 - T_5)] \cdot (T_4 - T_5) + 58 \cdot (1 - \varepsilon) \quad (8)$$

sendo $T_{\text{corrs}w2}$, a temperatura de superfície corrigida considerando a emissividade estimada no campo pelo método da caixa; T_4 e T_5 , os valores de T(RAD) encontrados, respectivamente, para os canais 4 e 5 do sensor. A temperatura de superfície para cada *pixel* de trabalho foi calculada considerando a emissividade estimada no campo pelo método da caixa ($T_{\text{corrs}w2} \text{ EM}_{\text{caixa}}$). Também se calculou para os mesmos *pixels* a temperatura de superfície considerando a emissividade estimada no campo pelo método de proporção de vegetação/proporção

de solo descoberto ($T_{\text{corrs}w2} \text{ EM}_{\text{pgpv}}$). Esses valores foram correlacionados aos valores de T_{campo} e também comparados entre si. Para tanto os mesmos foram submetidos a testes "t" de médias, para que fosse verificado se as mesmas diferem.

Resultados e Discussão

Para um dossel vegetativo de trigo, ALMEIDA (1996) tomou como valor de "referência terrestre" os valores de medições de temperatura tomadas diretamente no campo. O autor encontrou um alto coeficiente de correlação entre esses valores de referência e os valores de temperatura do ar medidos por um termômetro de mercúrio. A partir daí, assumiu esses valores como referência e os correlacionou a valores de temperatura radiativa da superfície medidos com um teletermômetro de radiação infravermelha. Estando também esses valores altamente correlacionados, pôde inferir a respeito da boa qualidade dos dados de temperatura de superfície medidos com o teletermômetro. No presente trabalho, como em ALMEIDA (1996), valores de temperatura do ar medidos por um termômetro de mercúrio (T_{ar}) foram considerados como referência e correlacionados a valores de temperatura radiativa da superfície medidos também com um teletermômetro de radiação infravermelha (T_{campo}). Assim sendo, a cada valor médio de T_{campo}

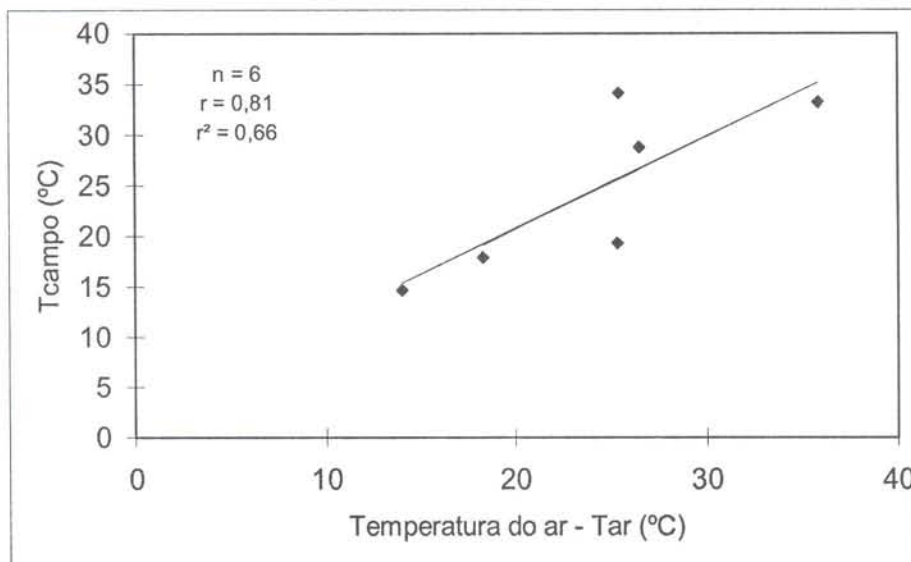


Figura 5. Reta de ajuste de T_{ar} (°C) x T_{campo} (°C).

correlacionou-se o seu respectivo valor de T_{ar} , medido durante uma mesma passagem do satélite NOAA-14/AVHRR. Para essa correlação foram usados os dados referentes a seis diferentes passagens. O coeficiente encontrado para essa correlação foi o de 0,81, o que permitiu então assumir T_{campo} como referência. A dispersão desses pontos, bem como a reta que melhor se ajusta a eles, pode ser observada na Figura 5. O resultado da correlação de T_{ar} com T_{campo} é reiterado pelo teste “t” de médias, no qual se busca a comprovação de que as médias de dois parâmetros não são estatisticamente diferentes. Assim, os valores pareados das médias de T_{ar} e T_{campo} foram submetidos ao teste “t” para amostras em par para médias, não sendo significativo, pelo que se conclui que o contraste entre as médias não difere de zero.

O restante dos dados foram, então, tratados partindo-se da hipótese comprovada de que T_{campo} representa a referência terrestre. Assim, os valores de temperatura do ar medidos por um termômetro de mercúrio (T_{ar}), considerados como de referência, são equivalentes aos valores de temperatura radiativa da superfície medidos com um teletermômetro de radiação infravermelha (T_{campo}), pois foi verificada uma dependência dos valores de temperatura de superfície à temperatura do ar próximo a ela.

Calculados os valores médios de emissividade estimada por cada um dos métodos, a saber, a emissividade estimada pelo método da caixa (EM_{caixa}) e aquela estimada pelo método da proporção de cobertura vegetal/proporção de solo descoberto (EM_{pvpg}), os mesmos foram submetidos ao teste “t” de médias para que fosse verificado se essas médias diferem entre si. O resultado dessa comparação não foi significativo, podendo-se concluir que o contraste entre as médias não difere de zero o que nos leva a inferir a respeito da equivalência de uso tanto de um método como de outro, para que se obtenha um valor estimado de emissividade da superfície cultivada. Desse modo, os valores médios de emissividade da superfície cultivada podem igualmente ser estimados tanto pelo método da caixa (EM_{caixa}) como pelo método da proporção de cobertura vegetal/proporção de solo descoberto (EM_{pvpg}). A decisão quanto ao uso de um método ou de outro deve depender principalmente da disponibilidade de equipamentos.

O objetivo final do tratamento dos dados foi o de comparar os valores de temperatura obtidos pela equação *split-window* na qual foram considerados dados médios de emissividade estimada pelos dois métodos. Assim, foi feita uma comparação entre as temperaturas de superfície corrigidas pela equação

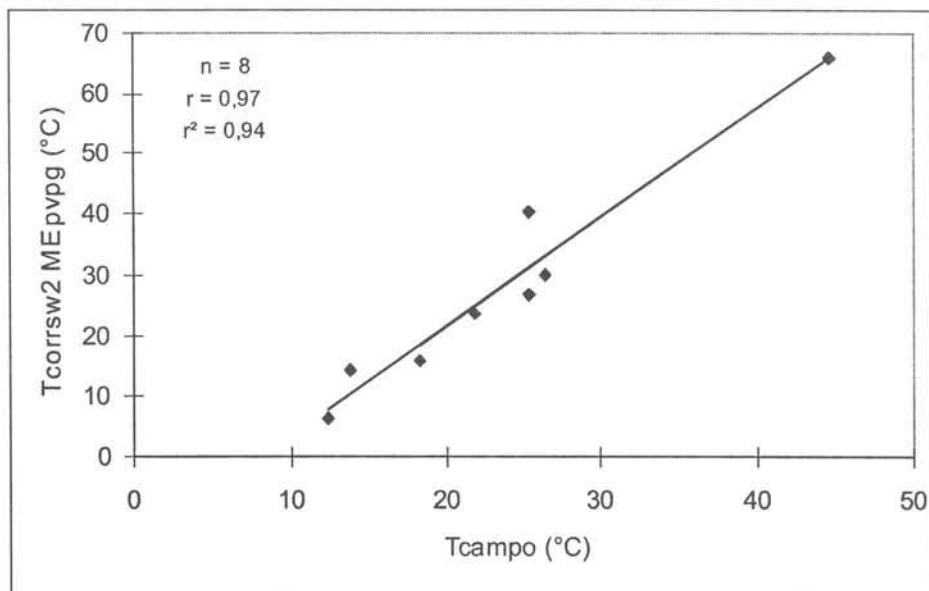


Figura 6. Reta de ajuste de $T_{corrsw2} EM_{pvpg}$ (°C) x T_{campo} (°C)

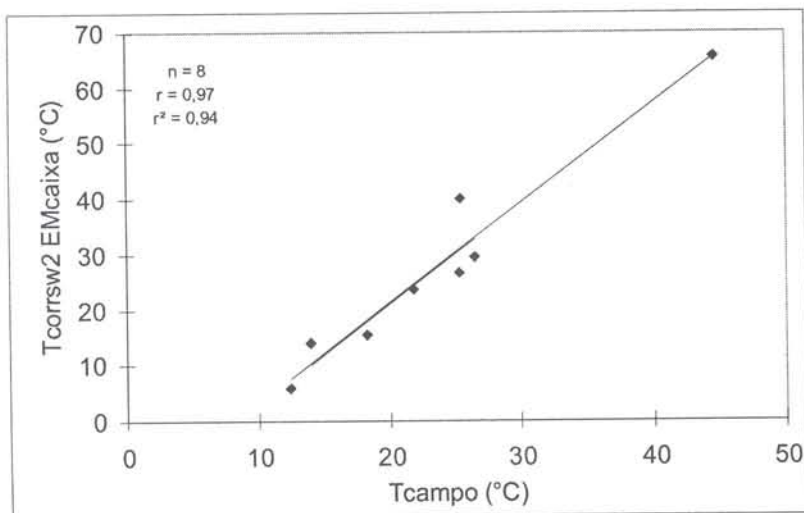


Figura7. Retas de ajuste de $T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{caixa}}$ (°C) x T_{campo} (°C)

de *split-window* que considera a emissividade estimada pelo método da caixa ($T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{caixa}}$) e pela equação de *split-window* que considera o método da proporção de cobertura vegetal/proporção de solo descoberto ($T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{pvpv}}$), como se verá a seguir.

Comparação entre $T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{caixa}}$ e T_{campo} e entre $T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{pvpv}}$ e T_{campo}

Os valores de T_{campo} medidos em oito passagens do satélite NOAA-14/AVHRR foram correlacionados tanto aos valores de $T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{caixa}}$ quanto aos valores de $T_{\text{corrsw2}} \text{EM}_{\text{pvpv}}$ e uma análise de regressão linear simples foi feita. Ainda que alguns valores de T_{corrsw2} se situassem fora do intervalo estabelecido pelo grau de dispersão dos valores médios de T_{campo} , foi observado entre esses valores um r^2 de 0,94, significativo ao nível de 5% de probabilidade. Isso indica a alta correlação entre os dados de T_{corrsw2} e T_{campo} tanto para o método EM_{caixa} quanto para método EM_{pvpv} de estimativa da ϵ . Os gráficos com as dispersões desses dados, para cada método de estimativa de emissividade são mostrados nas Figuras 6 e 7.

Esse resultado foi confirmado pela correlação entre T_{corrsw2} e T_{ar} com r^2 de 0,86, significativo ao nível de 5% de probabilidade. Dessa forma, o método *split-window* “atualizado” de correção da temperatura de superfície obtida a partir de dados orbitais, teve a viabilidade da sua aplicação comprovada com a aplicação de valores de

emissividade da superfície estimados tanto pelo método da caixa como pelo método da proporção de cobertura vegetal/proporção de solo descoberto. Assim, a Equação 9 representa a etapa final dos métodos de correção aqui propostos e é indicada como sendo o principal resultado deste trabalho, sendo apresentada a seguir:

$$T_{\text{corrsw}} = T_4 + [1,17 + 0,52 \cdot (T_4 - T_5)] \cdot (T_4 - T_5) + 58 \cdot (1 - \epsilon) \quad (9)$$

sendo: T_{corrsw} , a temperatura de superfície captada pelo satélite NOAA/AVHRR e corrigida, pelo método *split-window*, quanto aos efeitos atmosféricos e de emissividade; T_4 , o valor de temperatura captado pela banda 4 do sensor AVHRR para uma determinada passagem; T_5 , o valor de temperatura captado pela banda 5 do sensor AVHRR para uma determinada passagem; e ϵ , o valor de emissividade que pode ser estimado tanto pelo método da caixa como pelo método da proporção de cobertura vegetal e proporção de solo descoberto.

Conclusões

A análise dos dados finais levou às seguintes conclusões principais:

- 1) Foi desenvolvida, testada e comprovada a eficiência de uma adaptação, para a cana-de-açúcar, do “método da caixa” para a estimativa da emissividade da vegetação;
- 2) também foi testada e comprovada a eficiência de um método alternativo ao “método da

caixa adaptado” para a estimativa da emissividade de uma superfície cultivada com cana-de-açúcar a partir de dados coletados no campo, sendo recomendada a sua utilização quando em condições de campo adversas à execução plena do método da caixa, em quaisquer de suas variantes, conforme descrito por ALMEIDA (2001);

3) foi ainda testada e comprovada a eficiência de uma equação do tipo *split-window* para a correção atmosférica de dados orbitais de temperatura de superfície, na qual sejam considerados dados médios de emissividade estimada de uma determinada superfície cultivada, podendo esses dados de estimativa ser usados como subsídio a estudos de emissividade usando dados NOAA-AVHRR.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, C. S. A., **Estimativa da temperatura de superfície cultivada com trigo (*Triticum aestivum* L.) usando dados NOAA-14/AVHRR.** 1996. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

ALMEIDA, C. S. A., **Estimativa da emissividade para a determinação da temperatura do dossel de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) utilizando dados AVHRR-NOAA.** 2001. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

BUETNER, K. J. K.; KERR, C. D. The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces. **Journal of Geophysical Research**, n. 70. p. 1329-1337. 1965.

CASELLES, V.; SOBRINO, J. A. Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, n. 29. p. 135-146. 1989.

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.** Valencia España: Universitat de València, 1991. p. 149-182.

COLL, C. **Un modelo operativo para la determinación de la temperatura de la superficie terrestre desde satélites.** 1994. 254p. Tese (Doutorado em Física) - Facultad de Física, Departamento de Termodinámica, Universidad de Valencia, 1994.

COMBS, A. C. et al. Application of infrared radiometers to meteorology. **Journal of Applied Meteorology**, n. 4, p. 253-262. 1965.

KIDWELL, K. B. **NOAA polar orbiter data. Users Guide.** Washington, D.C., USA: NOAA / NESDIS / OSDPD, 1995. 287p.

RUBIO, E. **Influencia de la radiancia atmosférica descendente en las medidas de emissividade y temperatura de la superficie del suelo.** Valencia - España: Universidad de Valencia - Facultad de Física - Departamento de Termodinámica., 1994. 114p. (trabajo de investigación).

RUBIO, E.; CASELLES, C.; BADENAS, C. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14mm wave band: analysis of two field methods. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 490-521. 1997.

VALOR, E. & CASELLES, C. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. **Remote Sensing of Environment**, n. 57, p. 167 - 184. 1996.

MIRALLES, J. M. Fundamentos físicos de la teledetección: leyes e principios básicos IN: Gandia, S. & Meliá, J. In: **La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado.** Valencia, España : Universitat de València, 1991, p. 50-83.