

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS DECORRENTES DE MUDANÇAS NO USO DA TERRA MEDIANTE SENSORIAMENTO REMOTO

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Universidade Federal de Campina Grande

Rua Aprígio Veloso, 882, Bloco CL, Bodocongó, CEP 58429-140 - Campina Grande (PB) - Brasil
Tel./Fax: (+ 55 83) 2101 1323 e 3310 1202 - bernardo@dca.ufcg.edu.br

Dr. Saulo Tasso Araújo da Silva
saulo@funceme.br

Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
heliofab@hotmail.com

RESUMO

O sensoriamento remoto possibilita identificar mudanças em diversos biomas terrestres, particularmente mediante análise das componentes dos balanços de radiação e energia. Algumas dessas componentes oferecem importantes informações na gestão do espaço agrário brasileiro, particularmente devido a grande dimensão geográfica deste país. Nesta pesquisa são contempladas as bacias do rio Mogi-Guaçu - SP e do Baixo Jaguaribe - CE e objetiva avaliar alterações climáticas promovidas pela substituição da vegetação primária por cultivos agrícolas com o Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL. Utilizou-se imagens TM - Landsat 5, com cobertura nas duas bacias no anos de 2005 e 2006. Foram gerados mapas temáticos do albedo, temperatura da superfície, índices de vegetação, saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e evapotranspiração real diária (ET_r). Dados micrometeorológicos coletados em três torres instaladas nas referidas bacias foram empregados na validação do SEBAL.

Palavras-chave: Radiância, uso do solo, albedo, temperatura da superfície, calor latente.

ABSTRACT

Remote sensing makes it possible to identify land-use changes in several biomes on Earth, particularly by analyzing radiation and energy balances components. Some of these components provide important information on the management of rural areas in Brazil, particularly due to the large geographical size of this country. This research covers Mogi-Guaçu - SP and Lower Jaguaribe - CE basins and its main objective is to evaluate climate change promoted by replacement of primary vegetation by agricultural crops with the Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL. TM - Landsat 5 images covering the two basins in 2005 and 2006 years were used in this study. Thematic maps of albedo, land surface temperature, vegetation indices, net radiation - R_n, soil heat flux, sensible heat flux, latent heat flux and daily evapotranspiration - ET_r were derived from SEBAL. Micrometeorological data collected in three towers located in these basins were used to validate the SEBAL.

Key words: Radiance, reflectance, albedo, sensible heat, latent heat.

RÉSUMÉ

La télédétection permet d'identifier les changements dans les biomes de plusieurs, en particulier par l'analyse des composantes du rayonnement et de bilans énergétiques. Certains de ces composantes fournissent des informations importantes sur la gestion de l'agriculture brésilienne, en particulier étant donné la taille géographique de ce pays. Cette recherche sont couverts bassins de la Mogi-Guaçu - SP et le Bas-Jaguaribe - CE et d'évaluer objectivement le changement climatique promues par le remplacement de la végétation primaire par les cultures agricoles avec l'algorithme Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL. Nous avons utilisé TM - Landsat 5, qui couvre les deux bassins dans les années 2005 et 2006. Les cartes thématiques ont été générés à partir de l'albédo, la température de surface, indices de végétation, le rayonnement net (R_n), flux de chaleur du sol (G), flux de chaleur sensible (H), l'évapotranspiration flux de chaleur latente (LE) et de tous les jours (RTS). les données recueillies dans micrométéorologiques trois tours situées dans ces bassins ont été utilisées pour valider les SEBAL.

Mots-clé: Rayonnement, utilisation des terres, l'albédo, température de surface, chaleur latente.

INTRODUÇÃO

O tempo e o clima exercem grande influência sobre o tipo e estado da vegetação terrestre, mas ao mesmo tempo podem ser afetados em decorrência de mudanças naturais e/ou antrópicas no uso da terra. Nesse sentido, avaliar alterações nas componentes dos balanços de radiação e de energia em áreas de vegetação nativa que estão sendo substituídas por cultivos comerciais, ganha a cada

dia mais importância em face às alterações climáticas em curso no nosso planeta. Nesse particular, grande atenção deve ser dada ao fluxo de calor latente, que essencialmente representa fluxo de massa na forma de vapor d'água para a atmosfera do nosso planeta, e ao fluxo de calor sensível, grande responsável pelo aquecimento das áreas urbanas.

Os padrões apresentados por diferentes componentes do balanço de radiação e energia à superfície sobre diferentes tipos de vegetação são controlados por características da superfície, como albedo, área foliar, rugosidade, capacidade fotossintética, entre outros, que controlam a temperatura e umidade do ar, a velocidade do vento, a evapotranspiração e até mesmo a precipitação (PIELKE et al., 1991). Um exemplo desta relação de controle da superfície no clima ocorre quando da conversão de áreas com culturas agrícolas anuais por reflorestamento, que levaria a uma significativa redução do albedo, aumento da evapotranspiração e, conseqüentemente, a uma significativa redução da temperatura (Jackson et al., 2005). No Brasil, tem se registrado com maior frequência o contrário, ou seja, a substituição da vegetação primária por culturas anuais ou perenes, pastagens e florestas de rápido crescimento.

No Estado de São Paulo grandes extensões da vegetação primária foram transformadas em agroecossistemas e a cana-de-açúcar passou a ocupar os solos mais férteis de áreas em que predominava o Cerradão e a floresta estacional, embora atualmente a mesma esteja também ocupando solos mais arenosos. Com papel destacado dentre os biocombustíveis, a cana-de-açúcar tornou-se um monocultivo intensivamente explorado, com reais possibilidades de influenciar o clima regional através de alterações que promovam no balanço de energia local e em decorrência dos efeitos causados pelos aerossóis provenientes das queimadas. Estudos do balanço de energia em cana-de-açúcar (CABRAL, 2001; CABRAL et al., 2003; NEGRÓN-JUAREZ, 2004; GOMES et al., 2009) mostram que nas áreas com cana-de-açúcar ocorre uma redução no saldo de radiação e na evapotranspiração média anual, além de aumento na temperatura do ar, em comparação às áreas do Cerrado.

O SEBAL (Surface Energy Balance for Land) é um dos mais destacados algoritmos para estudos dos fluxos de calor e massa na superfície, por exigir poucos dados de superfície, o que o faz o mais utilizado na atualidade em diversas regiões do mundo (BASTIAANSEN et al., 1998a,b; BASTIAANSEN, 2000; HAFEEZ et al., 2002; AHMAD E BASTIAANSEN, 2003; TASUMI et al., 2005; SILVA E BEZERRA, 2006; BEZERRA ET AL, 2008; TEIXEIRA et al. 2009a,b). Grande número de aplicações do SEBAL ocorre em regiões áridas e/ou semiáridas e nesta pesquisa são contempladas duas áreas em condições climáticas muito distintas: bacia do rio Mogi-Guaçu, em virtude das alterações no uso da terra ali registradas nas últimas décadas, e bacia do baixo Jaguaribe, com inclusão de áreas irrigadas e de vegetação nativa. O desafio, portanto, consiste em se calibrar o SEBAL em diferentes ambientes do nosso país continental e investigar a sua aplicabilidade em condições climáticas diferentes daquelas que o mesmo tem sido usualmente aplicado. Nesse sentido, o objetivo do trabalho é avaliar as alterações climáticas promovidas pela substituição da vegetação primária nas duas bacias podem ser detectadas com o SEBAL.

MATERIAIS E MÉTODOS

Áreas de estudo

Uma das áreas de estudo compreende parte da bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, que inclui o município de Santa Rita do Passa Quatro (21°42'37"S; 47°28'41"W; 748 m), Estado de São Paulo. Destaque-se nessa área a existência da reserva Cerrado Pé-de-Gigante, parte integrante do município de Santa Rita do Passa Quatro e grandes extensões de cana-de-açúcar e eucalipto. O clima dessa região é marcadamente sazonal: com temperaturas médias mensais que variam entre 19°C, no mês mais frio, a 24°C no mês mais quente. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.498,0 mm, apresentando valores médios mensais superiores a 200 mm durante os meses de dezembro a fevereiro.

A outra área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, formada pelo DIJA (Distrito Irrigado Apodi-Jaguaribe), áreas de vegetação nativa e diversos pomares irrigados com bananeiras, mamoeiros e meloeiro, principalmente localizados no município de Quixeré (5°04'27"S; 37°59'19"W; 130m), estado do Ceará. O clima do município de Quixeré é tropical quente semiárido e, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo BSw'h'. A temperatura média anual é de 28,5°C, sendo as médias anuais das temperaturas mínima e máxima, respectivamente, de 22,5°C e 35,3 °C. A estação chuvosa situa-se entre os meses de fevereiro a maio, com média pluviométrica anual de 877,7mm e umidade relativa média anual de 62%.

Torres micrometeorológicas

Dados micrometeorológicos coletados em 2005/2006 nos biomas Cerrado e cana-de-açúcar foram empregados para calibração e validação do SEBAL. Esses dados foram cedidos pelo Departamento de Ciências Atmosféricas, Laboratório de Biosfera-Atmosfera (IAG/USP). A instrumentação utilizada nas duas torres micrometeorológicas instaladas em cada sítio, inclui medições automáticas de diferentes elementos do tempo e clima, que possibilitam a determinação dos balanços de radiação e de energia, além dos fluxos de massa (CO₂ e vapor d'água). As medições micrometeorológicas no bioma Cerrado ocorreram na Gleba Pé de Gigante (21° 37' 9,26" S; 47° 37' 56,38" W; 710 m), município de Santa Rita de Passa Quatro, SP e na cana-de-açúcar num talhão de aproximadamente 351 hectares, na Fazenda São José do Pulador, Usina Santa Rita (21°38'S; 47°47'W; 552 m). Na Bacia do Baixo Jaguaribe instalou-se outra torre em pomar de bananeiras irrigadas com cerca de 250 ha, de propriedade da fazenda Frutacor (5°04'35,34"S; 7°51'54,18"W; 135m). Na área foram efetuadas medidas que possibilitam a determinação dos balanços de radiação e de energia, além dos fluxos de massa (CO₂ e vapor d'água).

Dados radiométricos

As componentes dos balanços de radiação e de energia, subsequentemente usadas na determinação da evapotranspiração diária, foram obtidas a partir de imagens TM - Landsat 5 e alguns dados complementares de superfície. As imagens usadas no estudo da Bacia do Mogi-Guaçu foram adquiridas junto à Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e compreendem a órbita 200 e ponto 075, obtidas nos dias 22 de fevereiro, 11 de abril, 29 de maio, 14 de junho, 16 de julho, 01 de agosto, 17 de agosto e 21 de novembro de 2005. Na bacia do Jaguaribe foram usadas imagens correspondentes à órbita 216 e ponto 64, dos dias 24 de outubro de 2005, 28 de janeiro, 23 de julho, 8 e 24 de agosto de 2006.

O algoritmo SEBAL

O algoritmo SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land é alimentado com imagens de satélite que propiciam a determinação do albedo e temperatura da superfície, além de outras informações usualmente obtidas em estações meteorológicas de superfície. Suas bases teóricas e computacionais são descritas em Bastiaanssen et al. (1998a) e apresentadas em detalhe em Allen et al. (2002), Silva e Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008). Mais recentemente, Allen et al. (2007) apresentaram alterações importantes no SEBAL, para emprego do mesmo em áreas montanhosas.

a) Saldo de radiação

Na determinação do saldo de radiação instantâneo à superfície foram utilizados procedimentos empregados no SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998a; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005), sintetizado no diagrama esquemático da Figura 1, que representa as diferentes etapas de cômputo dos diferentes componentes do balanço de radiação. Informações adicionais sobre a obtenção da radiância, reflectância, índices de vegetação, emissividade, temperatura da superfície e albedo podem ser encontradas em Allen et al. (2002), Silva et al. (2005) e Gomes et al. (2009).

Conforme a Figura 1, a primeira etapa do balanço de radiação consiste na determinação da radiancia, seguida da reflectância e dos albedos planetário e da superfície. Com os índices de vegetação calculou-se as emissividades, a temperatura da superfície (Ts) e a radiação de onda longa emitida pela superfície – $RL\uparrow$ ($W\ m^{-2}$), esta segundo a equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \sigma T_{sup}^4 \quad (1)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$) e T_{sup} a temperatura da superfície (K).

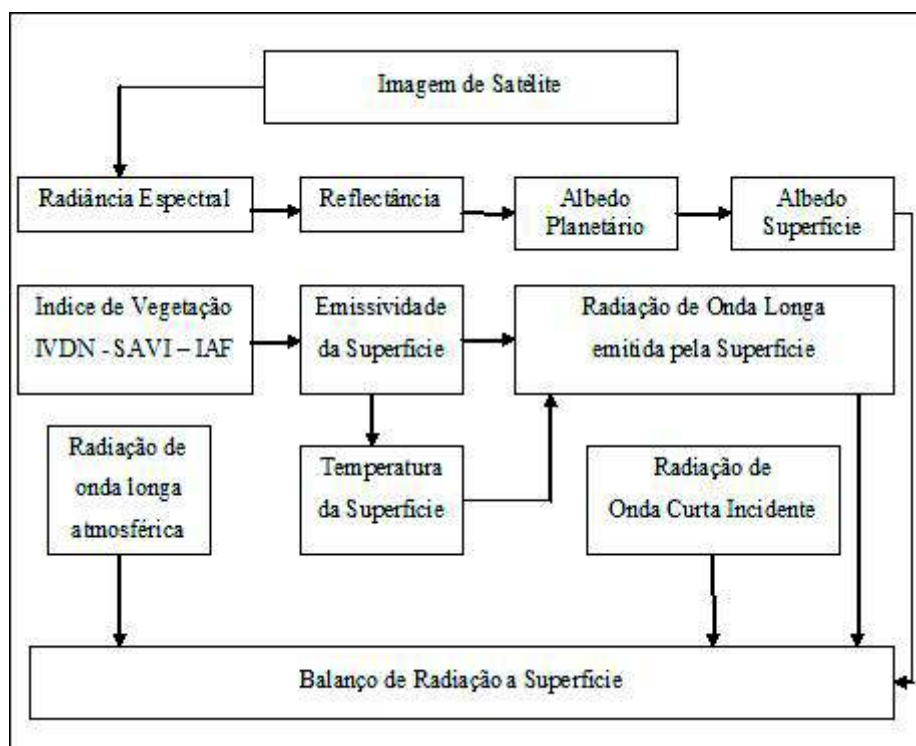


Figura 1 – Diagrama das etapas utilizadas para o processamento do balanço de radiação à superfície (R_n)

Na sequência foi obtida a radiação solar incidente – $RS\downarrow$ ($W\ m^{-2}$), que representa o fluxo de radiação solar (direta mais difusa) que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada por (BASTIAANSEN, 2000; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005):

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos\theta \cdot \tau_{sw} \quad (2)$$

em que S é a constante solar ($1367\ W\ m^{-2}$) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, dada por (ALLEN et al., 2007):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146P}{k_t} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (3)$$

em que P é a pressão atmosférica (KPa), W a água precipitável ($g\ cm^{-2}$), K_t coeficiente de turbidez atmosférica e Z o ângulo zenital do Sol. A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície – $RL\downarrow$ ($W\ m^{-2}$) também foi obtida através da equação de Stefan-Boltzmann com emissividade atmosférica dada por: $\epsilon_{atm} = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,75}$ e temperatura do ar - T_{ar} (K) medida com os dados das torres. Por fim, foi obtido o saldo de radiação instantâneo à

superfície – R_n ($W m^{-2}$), dado pela equação (ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005; BEZERRA et al., 2008):

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_s) R_{L\downarrow} \quad (4)$$

em que $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$), α é o albedo corrigido de cada pixel (-), $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel ($W m^{-2}$), $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida por cada pixel ($W m^{-2}$) e ε_s é a emissividade de cada pixel (-). Já o saldo de radiação diário – R_n24h ($W m^{-2}$) foi obtido mediante modelo calibrado para condições verificadas no Semiárido brasileiro por Teixeira et al. (2009a):

$$R_n24h = R_s (1 - \alpha) - 143 \tau24h \quad (5)$$

em que R_s ($W m^{-2}$) é a radiação solar diária medida em estação meteorológica interior à área de estudo e $\tau24h$ é a transmitância atmosférica média diária (-).

O balanço de energia à superfície compreende o cômputo do saldo de radiação (obtido acima), fluxos de calor no solo - G , de calor sensível - H e de calor latente - LE , todos em $W m^{-2}$. Em síntese, o balanço de energia é dado por: $R_n = LE + G + H$. A seguir são apresentadas as etapas de cômputo de cada uma dessas componentes.

b) Fluxo de calor no solo

O Fluxo de calor no solo - G ($W m^{-2}$) é computado segundo equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 IVDN^4) \right] R_n \quad (6)$$

onde T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$), α é o albedo da superfície, $IVDN$ é o índice de vegetação da diferença normalizada e R_n é o saldo de radiação. Para corpos de água, onde o $IVDN < 0$, o valor de G pode ser considerado como $G = 0,3 R_n$ (Silva et al., 2006; Bezerra et al., 2008).

c) Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível H ($W m^{-2}$) é obtido com base na velocidade do vento - u_z ($m s^{-1}$) que juntamente com outras variáveis possibilita o cômputo da resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível – r_{ah} ($s m^{-1}$), além da temperatura da superfície - T_s , usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos à superfície. H pode ser obtido pela seguinte expressão (BASTIAANSEN et al., 1998a; ALLEN et al., 2002; ALLEN et al., 2007; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA et al., 2008):

$$H = (\rho \times c_p \times dT) / r_{ah} \quad (7)$$

em que ρ é a densidade do ar úmido ($Kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J Kg^{-1} K^{-1}$), dT é a diferença de temperatura entre dois níveis próximos à superfície e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$). Para o cômputo de H são escolhidos dois “pixels âncoras”, para se determinar a variação de temperatura (dT) entre dois níveis de referência, bem como a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) em cada pixel da área de estudo, conforme ilustrado na Figura 2. Inicialmente, a velocidade do vento u ($m.s^{-1}$) e a altura média da

vegetação h (m) da estação meteorológica local, possibilita a obtenção do coeficiente de rugosidade - z_0 segundo equação $z_0 = 0,12 h$ (Brutsaert, 1982) e da velocidade de fricção u^* (m s⁻¹) pelo perfil logarítmico do vento. Em seguida projeta-se a velocidade do vento a 100 m - u_{100} (m s⁻¹) (blending height). Com a hipótese de que u_{100} é constante para toda a cena estudada, se obtém a velocidade de fricção em cada pixel, sendo obtido em função do IVAS (Bastiaanssen, 2000). De posse dos valores de estima-se a resistência aerodinâmica (s m⁻¹) admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra, ou seja:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (8)$$

onde z_1 e z_2 são as alturas (m) acima da superfície, as quais são consideradas (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2002; Silva e Bezerra, 2006; Allen et al., 2007) como sendo, $z_1 = 0,1$ m e $z_2 = 2,0$ m. Em seguida, calcula-se a diferença de temperatura próxima à superfície dT para cada pixel, que é obtida através da relação linear entre dT e T_s , conforme equação:

$$dT = a + bT_s \quad (9)$$

onde a e b são coeficientes da relação linear e são obtidos a partir dos pixels quente e frio (no pixel quente assume-se que $LE = 0$ e no frio que $H = 0$).

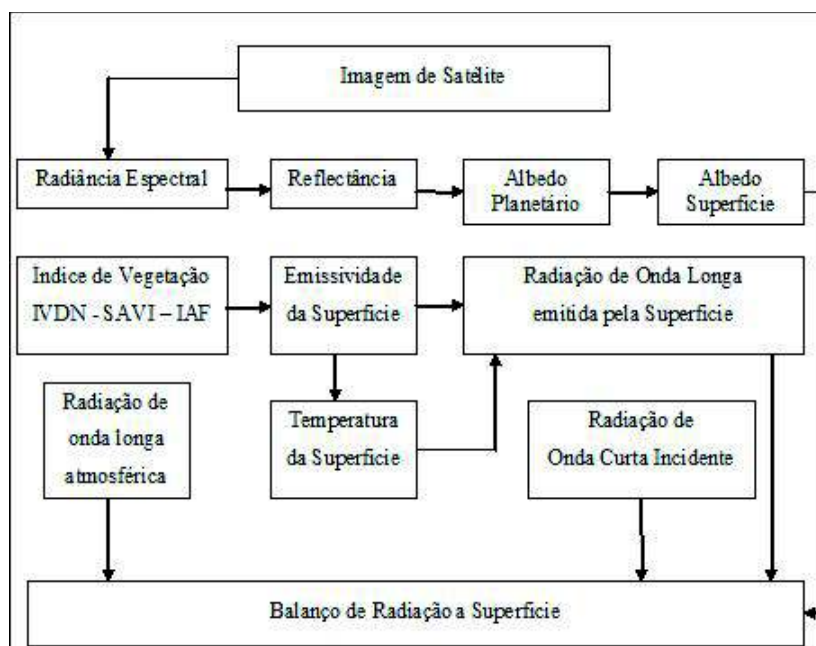


Figura 2 – Diagrama ilustrativo das etapas computacionais para o cálculo do fluxo de calor sensível - H

Nesse sentido, o comprimento de Monin-Obukhov L é utilizado para identificar a condições de estabilidade da atmosfera e corrigir a velocidade de fricção - u^* e a resistência aerodinâmica - r_{ah} (sm⁻¹). Com isso, novos valores de a e b da Equação 9 são obtidos e o processo se repete até que alcance estabilidade. Para detalhes recomenda-se Allen et al. (2002), Silva e Bezerra (2006) ou Bezerra et al. (2008).

d) Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente LE (W m⁻²) é obtido como resíduo do balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007; Silva e Bezerra, 2006; Bezerra et al., 2008):

$$LE = R_n - G - H \quad (10)$$

onde os fluxos foram obtidos no instante da passagem do satélite sobre a área de estudo. Uma vez determinado o LE instantâneo em cada pixel obtém-se a fração evaporativa instantânea – FEi = LE / (R_n – G). A evapotranspiração diária - ETr (mm) é obtida ao se considerar que a FEi instantânea é igual à FE_{24h} (Bastiaanssen et al., 1998a; Silva e Bezerra, 2006; Teixeira et al., 2009a):

$$ETr = \frac{LE_{24h}}{R_n - G} \quad (11)$$

em que LE_{24h} é o fluxo de calor latente diário (W m⁻²) e o saldo de radiação diário – R_{n24h} (W m⁻²) foi obtido mediante modelo calibrado para condições verificadas no Semiárido brasileiro por Teixeira et al. (2009a):

$$R_{n24h} = R_s (1 - \alpha) - 143 \tau_{24h} \quad (12)$$

em que R_s (W m⁻²) é a radiação solar diária medida em estação meteorológica interior à área de estudo e τ_{24h} é a transmitância atmosférica média diária. Logo, a ETr diária (mm) foi obtida segundo equação:

$$ETr = \frac{LE_{24h}}{R_n - G} \quad (13)$$

em que os valores 86.400 e 2.450.000 correspondem à transformação do LE em mm dia⁻¹.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta pesquisa foram obtidos os componentes dos balanços de radiação e energia nas condições climáticas das bacias hidrográficas do rio Mogi-Guaçu - SP e do rio Jaguaribe – CE. Ademais, avaliou-se as consequências climáticas promovidas pela substituição da vegetação primária por cultivos agrícolas nas referidas bacias. Nesse sentido, foram elaborados mapas temáticos de diferentes componentes dos balanços de radiação e energia, além da evapotranspiração real, que estão sumarizados em tabelas.

Mapas temáticos do albedo na Bacia do Mogi-Guaçu

Na Figura 3 está representado o mapa temático do albedo da superfície relativo à bacia do Mogi-Guaçu para o dia 22 de fevereiro de 2006. O albedo das áreas com presença de água, leito de riachos e do rio Mogi-Guaçu, foram inferiores a 9% e compreendem a classe dos mais baixos valores de albedo da superfície. Silva et al. (2005) mostraram que corpos de água, tais como o lago de Sobradinho e pequenos açudes do perímetro irrigado Nilo Coelho, apresentaram valores entre 9 e 12%, um pouco superiores aos encontrados nesta pesquisa. Já Meireles (2007), em estudo na bacia do Acaraú - CE, encontrou valores entre 3 e 10% para corpos de água, similares aos desta pesquisa. Na referida figura prevalecem valores de α_{sup} na categoria 16 a 20 %, e nas áreas com vegetação de maior porte albedo entre 9 e 13 %. As áreas com cana-de-açúcar apresentaram valores na faixa

entre 16 a 20%; no entanto, podem ser também observados valores entre 18 a 22%. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Tasumi et al. (2005), que observaram valores entre 16 e 24% para regiões agricultáveis em Idaho – EUA. Na Tabela 1 estão representados os valores do albedo obtido com o SEBAL nos biomas Cerrado e cana-de-açúcar, com os correspondentes Erros relativos (%). No Cerrado, o Erro relativo médio foi de 9,10%, enquanto na cana-de-açúcar esse erro médio foi de 9,37%.

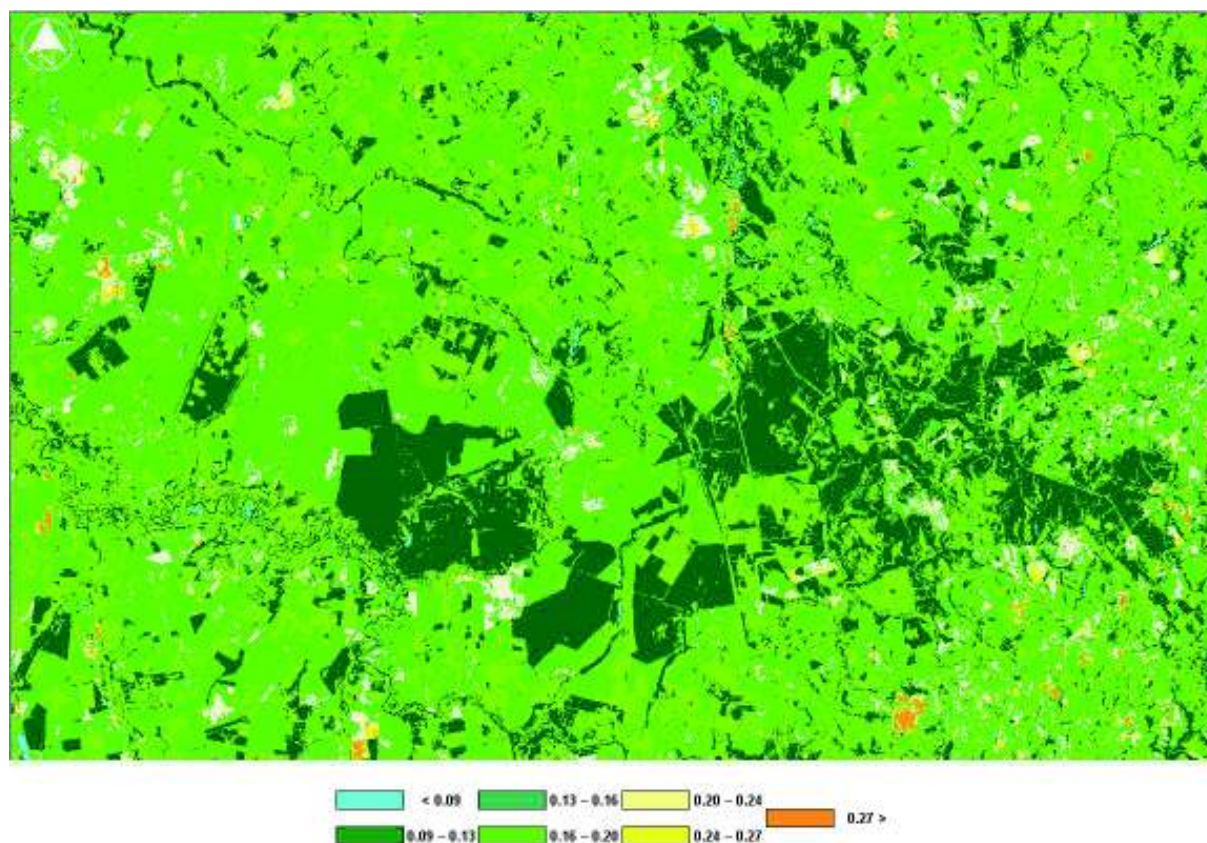


Figura 3 – Albedo da superfície em 22 de fevereiro obtido com o sensor TM – Landsat 5. As regiões assinaladas correspondem às áreas estudadas (a) Cerrado e (b) Cana-de-açúcar

Observa-se que o albedo da cana-de-açúcar é sistematicamente superior ao do Cerrado, o que impacta o saldo de radiação. Embora o R_n no Cerrado seja superior ao da cana, com resultado do menor albedo e menor T_s , a temperatura do ar nos campos de cana-de-açúcar tende a ser superior ao observado sobre o Cerrado.

Mapas temáticos do saldo de radiação na Bacia do Mogi-Guaçu

Na Figura 4 está representado o mapa temático de R_n obtido em 21 de novembro de 2005. Fica evidenciada a supremacia da classe com R_n superior a 700 W m^{-2} e, como se depreende, corresponde a áreas de Cerrado. Os valores do R_n nas áreas de solo nu, ou com grande exposição, corroboram com os encontrados por Silva e Bezerra (2006) para áreas com características similares, do Projeto Nilo Coelho e adjacências no município de Petrolina- PE.

Os valores mais elevados R_n foram observados sobre áreas com albedo baixo, compreendendo espelhos d'água, que apresentaram valores superiores a $731,0 \text{ W m}^{-2}$. Esses valores estão em conformidade com estudos realizados por Silva e Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008), também em corpos de água. Ficou evidenciado que no Cerrado o R_n é superior ao observado em áreas com cana-de-açúcar, embora tenha se observado o oposto com a temperatura da superfície.

Tabela 1 - Albedo obtido nos biomas Cerrado e cana-de-açúcar com o SEBAL e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos, na Bacia do Mogi-Guaçu

Datas	Albedo – Cerrado			Albedo – Cana de Açúcar		
	SEBAL	Medido	Erro (%)	SEBAL	Medido	Erro (%)
22/2/2005	0,104	0,126	17,46	0,174	0,196	11,22
11/4/2005	0,108	0,126	14,29	0,183	0,205	0,06
29/5/2005	0,136	0,127	7,09	0,189	0,169	11,83
14/6/2005	0,133	0,137	2,92	0,21	0,178	17,98
16/7/2005	0,111	0,123	9,76	0,217	0,190	14,21
1/8/2005	0,118	0,119	0,84	0,198	0,188	5,32
17/8/2005	0,121	0,120	0,83	0,197	0,188	4,79
21/11/2005	0,127	0,158	19,62	0,170	0,145	9,57

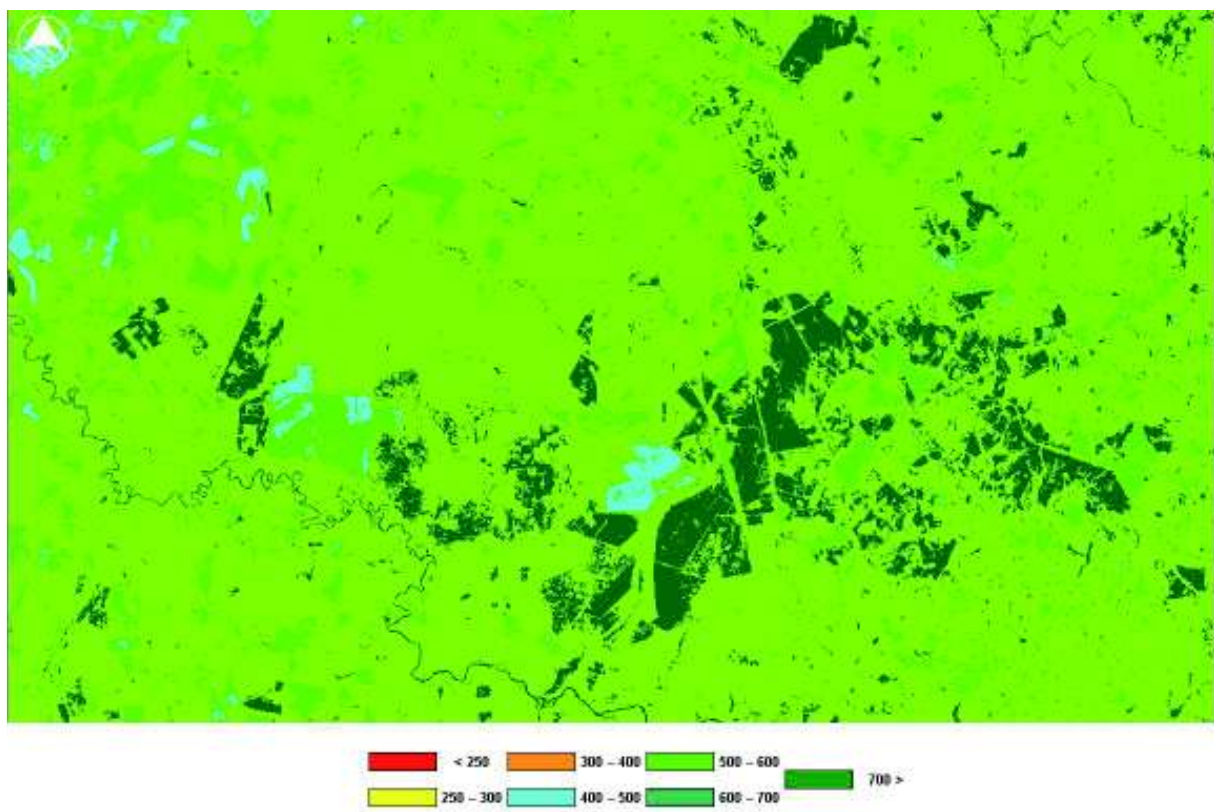


Figura 4– Saldo de radiação na superfície ($W m^{-2}$) para o dia 21 de novembro de 2005 obtido com o sensor TM – Landsat 5. As regiões assinaladas correspondem às áreas estudadas (A) Cerrado e (B) Cana-de-açúcar.

Na Tabela 2 estão representados os valores do saldo de radiação obtidos com o SEBAL e os medidos nas torres da cana-de-açúcar e Cerrado. Como se percebe houve variação significativa do R_n entre os meses estudados; porém, os valores do R_n obtidos segundo o SEBAL estão bem próximos aos medidos nas torres, Erro Relativo Médio de apenas 2,20 % no Cerrado e de 5,68 % na cana-de-açúcar. Considerando que o erro instrumental associado à obtenção de R_n é de 2,5%, a obtenção de erros relativos médios inferiores a 10% obtido numa imagem TM – Landast 5, com cerca de 38 milhões de pixels, representa um resultado de grande importância e utilidade prática. Estes resultados são corroborados por Daughtry et al. (1990), que obtiveram Erro Relativo Médio inferior a 7%.

Tabela 2 - Valores do saldo de radiação (Rn) instantâneo dos biomas Cerrado e da Cana-de-açúcar obtidos mediante SEBAL com respectivos erros relativos (%)

Datas	Rn (Wm ⁻²) – Cerrado			Rn - Cana de Açúcar (Wm ⁻²)		
	SEBAL	Medido	Erro (%)	SEBAL	Medido	Erro (%)
22/2/2005	618,5	640,6	3,45	552,3	566,0	2,42
11/4/2005	520,9	540,1	3,55	459,8	478,2	3,85
29/5/2005	379,7	382,0	0,60	300,8	350,9	14,28
14/6/2005	388,9	387,3	0,41	306,3	315,3	2,85
16/7/2005	378,3	375,6	0,72	300,1	320,5	6,37
1/8/2005	408,3	395,6	3,21	337,7	350,4	3,62
17/8/2005	448,8	448,3	0,11	376,9	386,3	2,43
21/11/2005	690,8	731,3	5,54	649,8	718,8	9,60

Mapa temático da evapotranspiração real na Bacia do Mogi-Guaçu

Na Figura 5 está representado um dos mapas temáticos da evapotranspiração real diária (ET24h), de parte da bacia do rio Mogi – Guaçu, para o dia 22 de fevereiro de 2005. Observa-se que a ET24h nos Cerrados apresenta uma grande estabilidade sazonal. Portanto, com pequena amplitude anual, diferentemente da cana-de-açúcar e outras áreas agrícolas da área de estudo. Pode-se concluir que o Cerrado, de um modo geral, apresenta Ts virtualmente inferior ao observado nas demais áreas de estudo, exceto aonde há cursos de água ou algum reservatório hídrico. A ET24h nos Cerrados é, em geral, maior que a ET24h das demais áreas, sendo equiparada em alguns dias apenas, aos valores observados em alguns talhões de eucalipto. Essa característica do Cerrado possibilita concluir que o clima local tem sido modificado em razão de sua substituição pela cana-de-açúcar. As áreas com valores de ET maiores que 7,0 mm,dia-1 estão representadas nas imagens pela cor verde escuro. Observa-se que essas áreas se concentram predominantemente nos biomas estudados, como já foi mencionado, que no caso do Cerrado é composto por vegetação bastante densa, com IVDN acima de 0,80. Os valores da ET nos dias estudados representam bem as áreas com cultivos agrícolas ou de vegetação nativa densa, como também, de vegetação rala e esparsa ou de solo exposto.

Na Tabela 3 são apresentados valores da ETh horária e ET24h obtidos pelo algoritmo SEBAL, sobre os biomas Cerrado e cana-de-açúcar, para os dias selecionados. Na estação chuvosa foi observado que os valores da ETh e ET obtidos pelo SEBAL situaram-se em torno de 0,57 mmh-1 e 5,7 mmd-1, respectivamente, e que diminuíram durante o período de transição entre a estações úmida-seca e seca, atingindo o menor valor, em torno de 0,19 mmh-1 e 3,7 mmd-1, respectivamente; em seguida, torna a aumentar no início da estação chuvosa, com 0,69 mmh-1 e 6,0 mmd-1. Portanto, esse aumento pode ser atribuído ao fato da data da imagem coincidir com o período chuvoso da região, fazendo com que o solo e a vegetação tenham bastante água armazenada. Bezerra et al. (2008) encontraram valores horários de ETo variando de 0,66 mm.h-1, em setembro, a 0,87 mm.h-1, em meados de novembro, para a região do Cariri (CE).

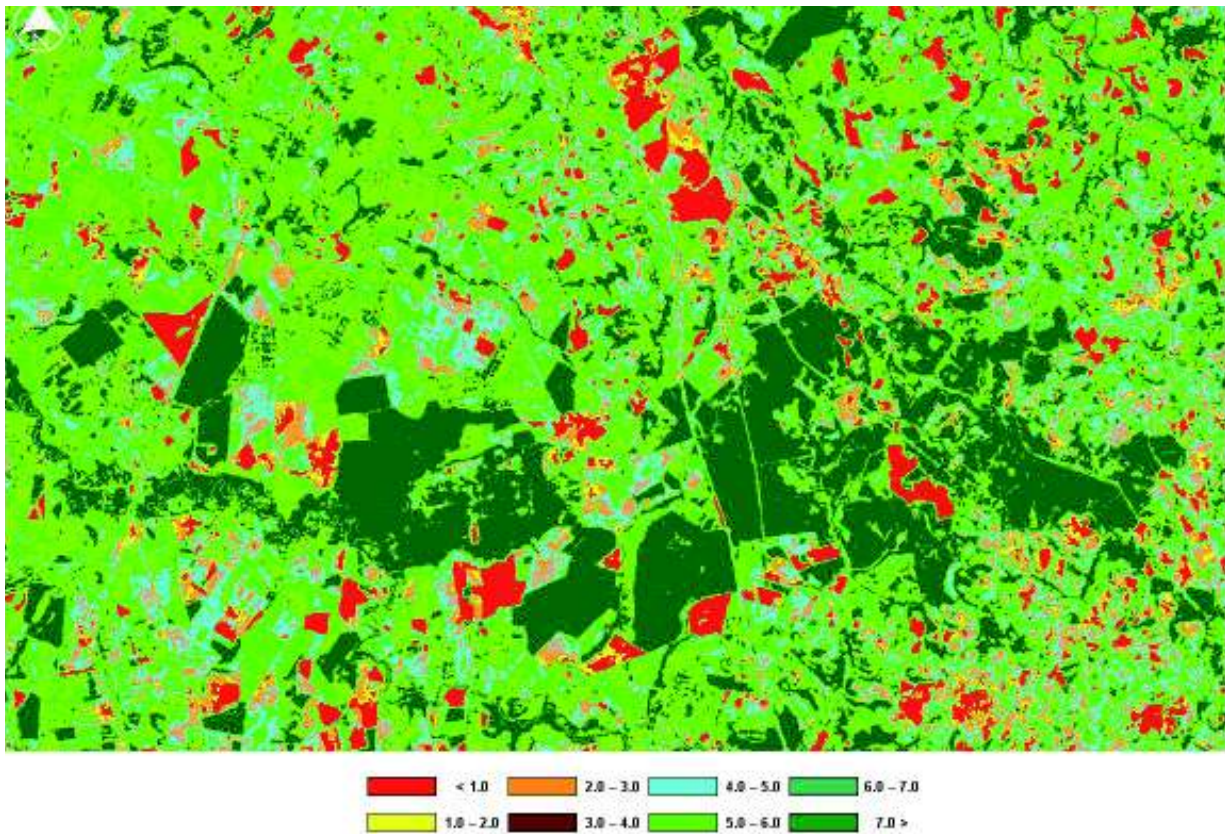


Figura 5 - Evapotranspiração real (mm dia-1) no dia 22 de fevereiro obtido com o sensor TM – Landsat 5. As regiões assinaladas correspondem às áreas estudadas (a) Cerrado e (b) cana-de-açúcar

Tabela 3 - Valores instantâneos da E_{Th} horária e ET diária sobre os biomas Cerrado e da cana-de-açúcar obtidos mediante SEBAL, E_{T0} diária das estações São Simão e São Carlos e a ET real para os biomas estudados

Data	ET real (mm d ⁻¹)				
	E_{T0} (mm h ⁻¹)	E_{Td} (mm d ⁻¹)		E_{T0} (mm d ⁻¹)	
		PDG / USR	CARLOS / SIMÃO		USR
22/2/2005	0,57	5,7	5,3	6,4	7,8
11/4/2005	0,49	4,4	4,9	5,2	6,7
29/5/2005	0,36	3,0	4,2	3,3	5,4
14/6/2005	0,31	2,5	3,7	3,3	6,6
16/7/2005	0,35	3,3	4,6	3,4	6,4
1/8/2005	0,39	3,9	4,0	2,9	5,3
17/8/2005	0,43	3,9	4,7	2,4	5,7
21/11/2005	0,69	6,0	5,5	6,2	6,9

Mapa temático do albedo na Bacia do Jaguaribe

Na Bacia do Jaguaribe foram extraídos valores do albedo e saldo de radiação em quatro alvos para análise dos resultados, destacados na Figura 6. Como pode ser observado na Figura 7, predominam na área de estudo duas classes de albedo: de 14 - 16% e 16 - 18 %; entretanto, no canto superior esquerdo do mapa percebe-se a predominância de classes de albedo entre 22 e 26%. Pode-se notar que no DIJA se destacam os pivôs centrais, compreendendo com maior cobertura as classes de 16 - 22% e de 22 - 24%, aparecendo também em menor proporção albedo variando 26 -

30%. Na Fazenda Frutacor há uma predominância de albedo variando de 16 a 18%, enquanto que no plantio de melão irrigado predomina a classe de albedo de 22 - 24%. O leito do rio Jaguaribe evidencia a presença da albedo inferior a 10%, mas também a presença de albedo superior a 28%, provavelmente associada à presença de bancos de areia. Os resultados obtidos mostram grande semelhança com os obtidos por Bezerra et al. (2008). Martins (2000) encontrou albedo entre 12 e 13% para caatinga, para a mesma região de estudo, também corroborando com Silva et al. (2005) para áreas irrigadas com frutíferas e de 20 a 30 % para Caatinga, na região do vale do Rio São Francisco (Bahia/Pernambuco).

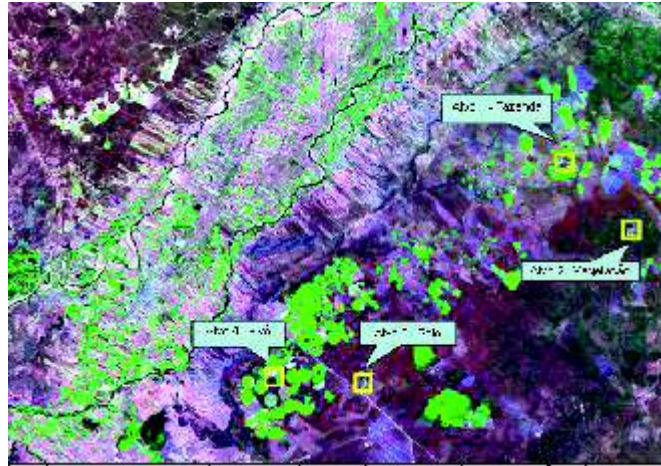


Figura 6 - Alvos escolhidos para obtenção do albedo médio na bacia do Jaguaribe

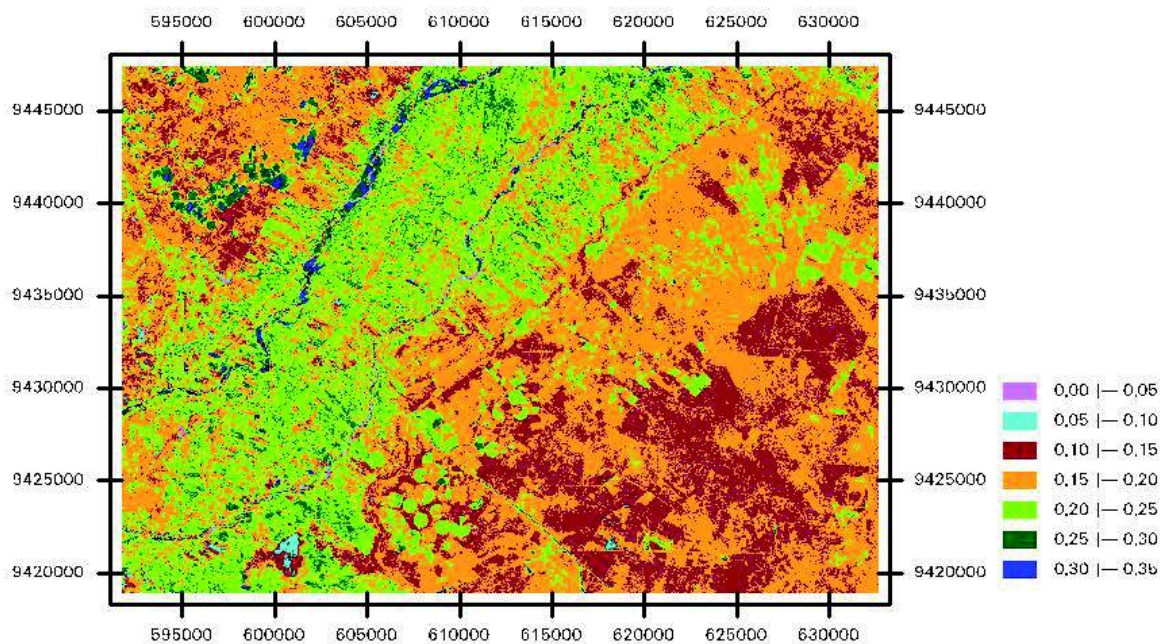


Figura 7 – Mapa temático do albedo para o dia 24 de outubro de 2005

Na Tabela 4 representou-se o albedo obtido nos quatro alvos selecionados. Observa-se que no alvo 1 o albedo variou de 0,167 a 0,194, com desvios padrão respectivos de 0,009 e 0,017. O alvo 4 foi o que apresentou maior estabilidade com variação de 0,167 a 0,184. Em todos os casos o menor albedo foi observado no dia 23 de julho, resultante da maior cobertura vegetal que se verifica ao final de estação local.

Tabela 4 – Albedo dos quatro alvos selecionados na Bacia do Jaguaribe

Data	Albedo	Alvos			
		1	2	3	4
24/outubro	Média	0,194	0,173	0,219	0,179
	Desvio padrão	0,017	0,005	0,016	0,013
23/janeiro	Média	0,193	0,173	0,209	0,184
	Desvio padrão	0,012	0,005	0,014	0,007
23/julho	Média	0,167	0,118	0,131	0,167
	Desvio padrão	0,009	0,004	0,007	0,010
08/agosto	Média	0,173	0,136	0,140	0,172
	Desvio padrão	0,012	0,004	0,009	0,010
24/agosto	Média	0,181	0,145	0,150	0,184
	Desvio padrão	0,011	0,006	0,010	0,009

Mapa temático do saldo de radiação na Bacia do Jaguaribe

Na Figura 8 está representada a distribuição espacial do saldo de radiação obtida pelo SEBAL na bacia do Baixo Jaguaribe no dia 24 de agosto de 2006. Para este dia o valor de Rn obtidos pelo SEBAL apresentou um desvio absoluto de 26 W/m², ocasionando Erro Relativo de 4%.

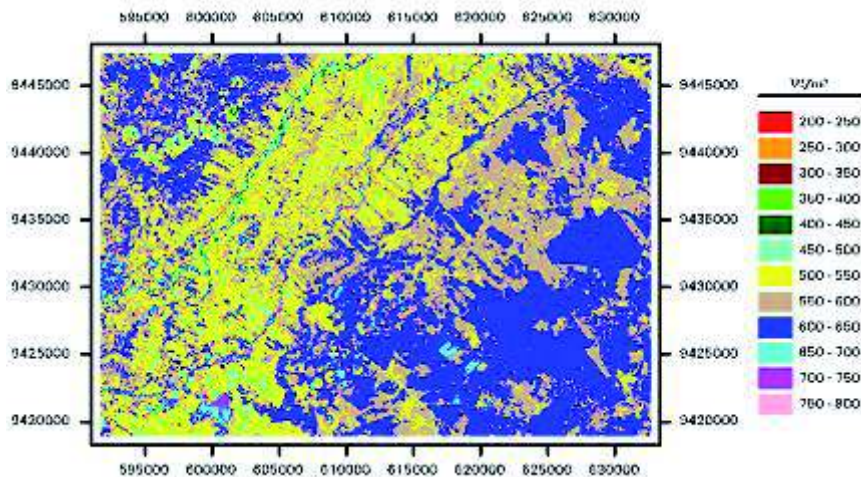


Figura 8 - Mapa temático do saldo de radiação na bacia do Baixo Jaguaribe usando o método METRIC para o dia 24/10/05

Tabela 5 – Saldo de radiação (W m-2) dos quatro alvos selecionados na Bacia do Jaguaribe

Data	Saldo de radiação	Alvos			
		1	2	3	4
24/outubro	Média	603,8	602,3	529,7	629,8
	Desvio padrão	17,7	5,0	12,8	15,9
28/janeiro	Média	554,7	552,2	501,4	589,4
	Desvio padrão	11,8	4,5	12,7	8,5
23/julho	Média	516,5	545,9	515,4	510,9
	Desvio padrão	8,0	3,3	10,0	7,2
08/agosto	Média	543,7	562,5	532,8	543,9
	Desvio padrão	10,1	3,7	9,9	8,8
24/agosto	Média	525,0	537,0	515,8	530,4
	Desvio padrão	10,0	4,6	8,9	7,9

Mapa temático da evapotranspiração real diária na Bacia do Jaguaribe

Observa-se na Figura 9 que nas áreas irrigadas prevaleceram valores nas classes 4 a 5 mm (verde claro) e 5 a 6 mm (verde escuro). Nas demais áreas há predomínio das classes de 2 a 3 mm e de 3 a 4 mm. Detectaram-se poucos pixels com ET_{24h} inferior a 1 mm. Nas áreas irrigadas do DIJA e demais pomares da região, prevalecem valores de ET_{24h} nas classe de 4 a 5 mm e de 5 a 6 mm.

Os resultados das medidas da ET_{24h} realizadas pelo método das correlações turbulentas correspondeu a um valor médio de 3,6 mm.dia⁻¹, bem menor do que os obtidos com o SEBAL. O Erro Relativo Médio correspondente é muito alto, igual a 69,2 %. No entanto, ao considerar que o K_c da bananeira em plena fase de produção é da ordem de 1,1, pode-se usar as medições da ETo_{24h} e multiplicá-las pelo referido K_c. Ao utilizar este recurso, se obteve um Erro Relativo Médio de apenas 8,0 %, o que evidencia que a ET_{24h} SEBAL é mais representativa que aquela derivada das correlações de vórtice, conforme depreende-se da Tabela 6. Há inúmeras referências do não fechamento do BE segundo essa técnica e, ao mesmo tempo, que era esperado que os valores de H e LE da torre fossem influenciados pelas áreas sobre as quais o vento sopra até chegar aos sensores de medições turbulentas. Esses valores obtidos pelo SEBAL e com o artifício do K_c x ETo_{24h} são compatíveis com os apresentados em Teixeira et al. (2002), relativos a medições do consumo hídrico da bananeira cultivar Pacovan, durante dois ciclos de produção.

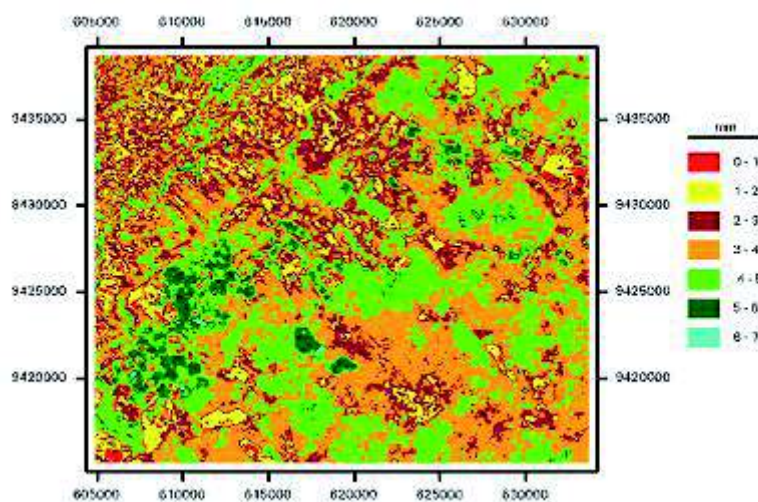


Figura 9 – Mapa temático da evapotranspiração real diária (ET₂₄), em 24/10/05

Tabela 6 - Estimativas e medidas da evapotranspiração real diária no pixel da fazenda Frutacor, estimativas da evapotranspiração de referência e resultados da validação

Data	ET ₂₄ (mm.dia ⁻¹)		ETo ₂₄ (mm.dia ⁻¹)
	Observado	Modelado	
24/10/05	3,6	6,9	6,4
28/01/06	3,7	5,4	6,7
23/07/06	3,9	5,3	4,4
08/08/06	3,1	6,3	5,7
24/08/06	3,8	5,3	4,6
Média	3.6	6,0	5,7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos conclui-se: a) que as componentes derivadas do SEBAL apresentam boa concordância com aquelas medidas nas torres micrometeorológicas; b) que a substituição do Cerrado por cana-de-açúcar resulta em aumento na temperatura do ar; c) as áreas irrigadas do Jaguaribe contribuem para redução da temperatura da superfície e, portanto, do ar.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AHMAD, M.; BASTIAANSEN, W. G. M. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations. **Irrigation and Drainage Systems**, v.17, p.141-161, 2003.
- ALLEN, R. G., TREZZA, R., TASUMI, M. **Surface energy balance algorithms for land**. Advance training and users manual, version 1.0, pp.98, 2002.
- ALLEN, R., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLSLAG, A. A. M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.
- BASTIAANSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – Validation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229, 1998b.
- BEZERRA, B. G., SILVA, B. B., FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the Atmosphere**, D-Reidel, Norwell, Mass. p.299, 1982.
- CABRAL, O. M. R.: **O sistema solo-vegetação-atmosfera: Observação e modelagem da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo. 96 p. 2001.
- CABRAL, O. M. R., ROCHA, H. R., LIGO, M. A. V., BRUNINI, O., SILVA DIAS, M. A. F. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre uma plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) em Sertãozinho, SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n.1, p.61-70, 2003.
- GOMES, H. B., SILVA, B. B. da, CAVALCANTI, E. P., ROCHA, H. R. da. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, v.28, p.153-164, 2009.
- JACKSON, R. B., JOBBÁGY, E. G., AVISSAR, R., ROY, S. B., BARRETT, D. J., COOK, C. W., FARLEY, K.A., LE MAITRE, D.C., MCCARL, B.A., MURRAY, B.C.: Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. **Science**, v.310, n.5756, p.1944-1947, 2005.
- MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 - TM na bacia do Acaraú – CE**. Dissertação de Mestrado, UFCE, Fortaleza, CE, Brasil, 2007.
- NEGRÓN-JUAREZ, R. I. **Variabilidade Climática Regional e Controle da Vegetação no Sudeste**: Um estudo de Observações sobre cerrado e Cana-de-açúcar e Modelagem Numérica da Atmosfera. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo. 159 p. 2004.
- PIELKE SR., R.A., DALU, G.A., SNOOK, J.S., LEE, T.J., KITTEL, T.G.F: Non linear influence of meso-escala land use on weather and climate. **Journal of Climate**, v.4, p.1053-1069, 1991.
- SANTOS, C. A., SILVA, B. B. Estimativa da evapotranspiração da bananeira em região semi-árida através do algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, p.9-20, 2008.
- SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base

- em imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005a.
- SILVA, B. B., LOPES, G. M., AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. ***Revista Brasileira de Meteorologia***, v.20, n.2, 243-252, 2005b.
- SILVA, B. B., BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. ***Revista Brasileira de Agrometeorologia***, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.
- TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. ***Irrigation and Drainage Systems***, v.19, p.355-376, 2005.
- TEIXEIRA, A.H. DE C., W.G.M., BASTIAANSSEN, AHMAD, M-UD-D, BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v.149, p.462-476, 2009a.
- TEIXEIRA, A. H. de C., BASTIAANSSEN, W. G. M., AHMAD, M. D., BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v.149, p.477-490, 2009b.

Trabalho enviado em novembro de 2010

Trabalho aceito em dezembro de 2010