

Mapeamento do Saldo de Radiação da Bacia do Alto Rio Negro, Região Sul Brasileira

Patrícia Kazue Uda¹, Cláudia Weber Corseuil², Masato Kobiyama¹

patricia.kazue@posgrad.ufsc.br; cwcorseuil@hotmail.com; kobiyama@ens.ufsc.br

Recebido: 17/07/12 - revisado: 24/10/12 - aceito: 18/02/13

RESUMO

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro, BARN, (3454 km²) localiza-se entre o Planalto Norte Catarinense e o Primeiro Planalto Paranaense. O estudo dos componentes dos fluxos de massa e energia entre a superfície e a atmosfera pode permitir verificar a influência do uso e cobertura do solo no clima da região. O objetivo do presente trabalho foi mapear o saldo de radiação (Rn) através do Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), na BARN, utilizando imagens do sensor Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer (ASTER). O SEBAL foi implementado com dados de uma estação meteorológica e cinco cenas do ASTER. Para análise do Rn foram selecionados polígonos (amostras representativas) de classes de uso e cobertura do solo da bacia. A classe água apresentou o maior valor médio de Rn (610 W m⁻²). As áreas de vegetação mais densa apresentaram elevado Rn (532 W m⁻² para reflorestamento e 526 W m⁻² para floresta nativa), juntamente com o solo exposto escuro (498 W m⁻²). As classes de agricultura e pastagem apresentaram valores intermediários de 444 W m⁻² e 451 W m⁻², respectivamente. Observam-se os menores valores médios para as áreas de solo exposto claro e áreas urbanas (404 e 429 W m⁻², respectivamente), correspondendo às áreas com maior perda de energia por reflexão e emissão.

Palavras-chave: Saldo de radiação, SEBAL, ASTER, uso e cobertura do solo, bacia do alto Rio Negro.

INTRODUÇÃO

Dentre os processos físicos na superfície terrestre, o saldo de radiação (Rn) é de fundamental importância na redistribuição de umidade e calor na baixa troposfera, visto que é o principal responsável pelo aquecimento do solo e do ar, bem como pela evapotranspiração (PEREIRA *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 2005).

Diversos equipamentos convencionais, como saldo-radiômetros, medem o saldo de radiação *in loco*, com boa precisão. No entanto, estes equipamentos resultam em medidas pontuais desta variável do balanço de energia, sendo representativas somente para pequenas áreas, sujeitas a condições semelhantes, localizadas no entorno da medição (di PACE *et al.*, 2008). Quando é necessária a determinação da distribuição espacial do Rn de áreas com características heterogêneas, técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto apresentam-se como uma alternativa apropriada.

Neste sentido, o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998), possibilita o cálculo do balanço de energia na superfície na forma distribuída. Ele tem como base a relação entre as radiâncias do espectro do visível, do infravermelho próximo e termal. Pode ser aplicado em áreas com grande contraste hidrológico, desde sistemas agrícolas homogêneos a bacias hidrográficas (sistemas heterogêneos). Este algoritmo estima a evapotranspiração como um residual do balanço de energia à superfície, calculando Rn como um dos parâmetros de entrada (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998; FOLHES *et al.*, 2009).

O SEBAL vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo, especificamente em bacias hidrográficas por Bastiaanssen (2000), Bastiaanssen & Bandara (2001), Mohamed *et al.* (2004), Teixeira *et al.* (2009), Karatas *et al.* (2009) e Gomes *et al.* (2009) com a utilização de imagens Landsat. Apesar de a teoria do SEBAL ter sido desenvolvida independente do tipo de imagem de satélite utilizada, Allen *et al.* (2002) apresentam sua base teórica para utilização de imagens do satélite Landsat 5 e 7. Entretanto, atualmente o algoritmo tem sido testado utilizando sensores com diferentes resoluções. Segundo French *et al.* (2005), o uso de dados do sensor *Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer* (ASTER)

¹ Laboratório de Hidrologia - CTC/ENS/UFSC

² CENG/ESA/UFPEl

com resolução espacial entre 15 e 90 m, em combinação com modelos que simulam transferência de energia, pode estimar detalhadamente os fluxos de energia de grandes áreas. Em adição, os autores afirmam que as imagens ASTER são capazes de detectar e discriminar variações na temperatura da superfície, emissividade, densidade de vegetação e albedo correspondentes a diferentes usos e coberturas do solo, assim como, reduz problemas de mistura espectral dos pixels. Para Santos *et al.* (2010), essas imagens aplicadas ao SEBAL, podem resultar em dados dos componentes relacionados à troca de radiação e energia entre atmosfera e superfície com adequada precisão e representação espacial. Apesar de a maioria dos estudos até o momento ter aplicado o SEBAL com imagens Landsat, alguns autores utilizaram imagens ASTER (*e.g.* HAFEZZ *et al.*, 2002; FRENCH *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2010). Desta forma, estudos que envolvam a utilização de sensores com melhor resolução espacial para estimar os componentes do balanço de energia são de grande importância para melhorar a precisão na estimativa de seus componentes.

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro, região sul brasileira, possui mais de 50% de sua área coberta por Floresta Ombrófila Mista. No entanto, o restante da área é caracterizado por intensas atividades agrícolas e florestais (plantio de espécies exóticas). Visto a mudança expressiva do uso e cobertura do solo da bacia nas últimas décadas, existe uma demanda quanto à compreensão do comportamento dos fluxos de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. Isso permitirá estudar a influência dessas mudanças no clima da região. Em adição, a quantificação mais precisa do Rn pode auxiliar na estimativa da evapotranspiração espacial da bacia, e, conseqüentemente, no gerenciamento de seus recursos hídricos.

O objetivo do presente trabalho foi mapear o saldo de radiação através do algoritmo SEBAL, na bacia hidrográfica do alto Rio Negro, por meio de imagens do sensor ASTER.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do alto Rio Negro (BARN) (aproximadamente 3454 km²), localizada no Planalto Norte Catarinense e no Primeiro Planalto Paranaense, entre as longitudes 49°55'27"O e 48°56'07"O e as latitudes 26°42'14"S e 25°55'32"S. Em Santa Catarina (SC), esta bacia a-

brange os municípios de Mafra, Rio Negrinho, Itaiópolis, São Bento do Sul e Campo Alegre. No Estado do Paraná (PR), compreende as cidades de Rio Negro, Tijucas do Sul, Agudos do Sul e Piên (Figura 1).

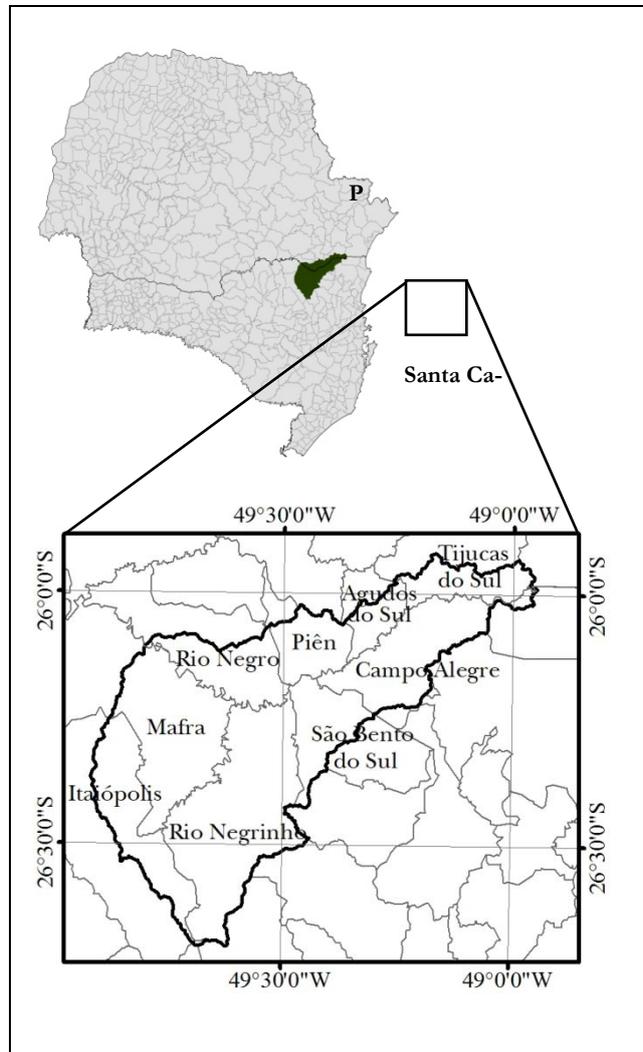


Figura 1 - Localização da bacia do alto Rio Negro.

Segundo a classificação de Köppen, a BARN está totalmente inserida em clima Cfb. As cidades que abrangem a BARN estão inseridas na zona agroecológica 3B – Planalto Norte Catarinense. Esta zona apresenta como principais características climáticas uma temperatura média variando entre 15,5 e 17,0 °C, com a máxima entre 24,0 e 26,6°C e mínima entre 10,8 e 11,8°C; a insolação total anual varia de 1.413 a 1.613 h ano⁻¹; a precipitação total anual varia de 1.360 a 1.670 mm ano⁻¹, com o total anual de dias de chuva entre 138 e 164 dias; a umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (E-

PAGRI/CIRAM, 2009). A BARN localiza-se em área com vegetação primária predominantemente de Floresta Ombrófila Mista (FOM) e algumas áreas de campos de altitude. A FOM, também conhecida como Floresta de Araucária, originalmente cobria 42,5% da área total do Estado de SC, correspondendo a sua maior cobertura vegetal (Santa Catarina, 2002).

Materiais

Para o pré-processamento das imagens foi utilizado o *software Environment for Visualizing Images (ENVI) 4.2*, e, para a implementação do SEBAL, o *ERDAS IMAGINE Professional 11.0*. O *software ArcGIS 9.3.1* foi utilizado para extração das informações estatísticas dos resultados do SEBAL e para a confecção dos *layouts* dos mapas apresentados.

As imagens utilizadas para a estimativa do Rn foram obtidas com o sensor ASTER. Esse sensor captura imagens da Terra, com resolução temporal de 16 dias, em 14 bandas espectrais que abrangem os comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo (resolução espacial de 15 m), infravermelho de ondas curtas (resolução espacial de 30 m) e infravermelho termal (resolução espacial de 90 m).

Para cobertura de toda a área da BARN foram necessárias cinco cenas do ASTER, sendo duas obtidas no dia 22 de abril de 2006 e três no dia 13 de abril de 2006, que foram selecionadas em função de serem as mais recentes obtidas para a área de estudo e com mínima cobertura de nuvens (Figura 2).

As cenas do sensor ASTER foram adquiridas em nível de processamento LIB, com pixels em valores de radiância. Em adição, foram adquiridas imagens de temperatura da superfície através da plataforma de dados on line do NASA *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)*, *USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota*.

Para o georreferenciamento das imagens e elaboração do modelo digital de elevação (MDE) foram utilizados dados vetoriais de cartas topográficas digitais. As cartas foram obtidas gratuitamente por meio da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), projeção Universal Transversa de Mercator, datum SAD-69 e fuso 22S. Os dados digitais são originados de cartas topográficas em escala 1:50.000.

Os dados meteorológicos para a implementação do SEBAL foram obtidos gratuitamente do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) e referem-se à radiação solar, velocidade do vento, umidade

relativa e temperatura do ar, adquiridos em escala horária da estação Lapa (latitude de 25°47'00"S e longitude de 49°45'58"O).

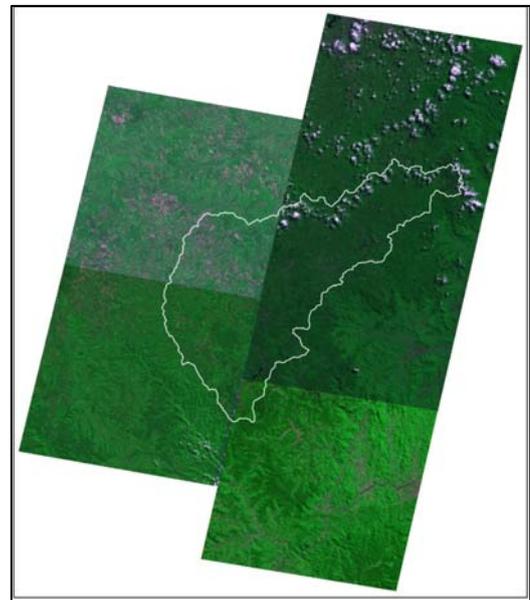


Figura 2 - Composição 231 das cenas ASTER.

Pré-processamento das imagens ASTER

Para estimar o Rn, primeiramente foi realizado o tratamento das imagens do sensor ASTER, que incluiu as etapas de georreferenciamento, calibração radiométrica e correção atmosférica.

O georreferenciamento foi feito com base em coordenadas x e y dos vetores de estradas municipais e intermunicipais, obtidos das cartas topográficas digitais que cobrem a BARN. A qualidade do georreferenciamento foi avaliada pelo total da raiz quadrada da média dos erros (RMS - *total root mean square*) e, visualmente, por meio da sobreposição dos vetores nas cenas georreferenciadas.

As cenas do ASTER, em nível LIB, foram convertidas para valores de reflectância da superfície e corrigidas dos efeitos atmosféricos causados pela absorção e pelo espalhamento molecular e de partículas. Esses procedimentos foram feitos no módulo *Fast Line of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)*. O FLAASH incorpora o modelo físico de transferência radiativa *moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm-4 (MODTRAN4)* para caracterizar a atmosfera e eliminar efeitos causados por partículas de vapor d'água, aerossol e gases (ozônio, dióxido de carbono, dentre outros). Os dados de entrada requeridos pelo mode-

lo consistiram das coordenadas geográficas do centro da cena, altitude do sensor, altitude média do terreno e data e horário de aquisição da imagem.

Estimativa do saldo de radiação (R_n)

Em função da diferença de datas das cenas ASTER, adquiridas para cobrir toda a BARN, fez-se necessária a criação de dois mosaicos das imagens. Assim, foi feito um mosaico com as imagens de 13 de abril e outro com as de 22 de abril de 2006. A metodologia do SEBAL foi então aplicada para cada mosaico, utilizando as informações da estação meteorológica e do arquivo de cabeçalho das imagens, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Informações da estação meteorológica e do arquivo de cabeçalho das imagens.

Informação	Data	
	13/04/2006	22/04/2006
Ângulo de elevação solar (°)	46,09217	43,30798
Temperatura do ar no horário próximo ao de passagem do satélite (°C)	21,0	17,7
Temperatura mínima do ar (°C)	11,2	11,4
Temperatura máxima do ar (°C)	26,2	23,1
Umidade relativa mínima do ar (%)	39	31
Umidade relativa máxima do ar (%)	100	100
Velocidade do vento no horário próximo ao de passagem do satélite (m s ⁻¹)	0,6	1,3
Radiação solar instantânea próxima ao horário de passagem do satélite (W m ⁻²)	594	617
Radiação de ondas curta incidente (média diária) (W m ⁻²)	235	229

O valor de R_n foi calculado por meio do balanço de energia da superfície, dado pela diferença entre a radiação solar e termal, incidente e refletida ou emitida da superfície:

$$R_n = R_{nS} + R_{nL} \tag{1}$$

onde R_n é o saldo de radiação (W m⁻²); R_{nS} é o saldo de radiação de ondas curtas (W m⁻²) e; R_{nL} é o saldo de radiação de ondas longas (W m⁻²). Esta forma pode ser escrita como:

$$R_n = [(1 - \alpha_{sup})R_{Sl}] + [R_{Ll} - R_{Ll} - (1 - \epsilon_0)R_{Ll}] \tag{2}$$

onde α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional); R_{Sl} é a radiação de onda curta incidente (W m⁻²); R_{Ll} é a radiação de onda longa incidente (W m⁻²); R_{Ll} é a radiação de onda longa emitida (W m⁻²); e ϵ_0 é a emissividade da superfície (adimensional).

O albedo foi calculado pelo método proposto por Liang (2000), que adota para o sensor ASTER a equação:

$$\alpha_{sup} = 0,484\rho_1 + 0,335\rho_2 - 0,324\rho_5 + 0,551\rho_6 + 0,305\rho_8 - 0,367\rho_9 - 0,0015 \tag{3}$$

onde ρ_1 a ρ_9 são as reflectâncias da superfície corrigidas dos efeitos atmosféricos em cada banda do ASTER, obtidas no modelo FLAASH.

A radiação de onda curta incidente corresponde ao fluxo de radiação que chega à superfície direta e difusamente. Esta foi calculada considerando condições de céu livre de nuvens:

$$R_{Sl} = S \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \tag{4}$$

onde S é a constante solar (1367 W m⁻²); $\cos \theta$ é o cosseno do ângulo zenital solar, calculado utilizando o ângulo de elevação solar disponível no arquivo de cabeçalho da imagem; dr é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (adimensional); e τ_{sw} é a transmitância atmosférica (adimensional).

O termo dr é expresso por:

$$dr = 1 + 0,033 \cos \frac{DJ2\pi}{365} \tag{5}$$

onde DJ é o dia sequencial do ano.

A transmitância atmosférica foi calculada por:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \tag{6}$$

onde z é modelo digital de elevação (m). O MDE foi elaborado pelo método de interpolação linear que utiliza uma rede triangular irregular (TIN- *Triangulated Irregular Network*) e um polinômio de primeiro grau para interpolar os valores de altitude. Os dados de altitude utilizados para a elaboração do MDE foram obtidos das curvas de nível e pontos cotados das cartas topográficas digitais.

O valor de R_{Ll} foi calculado pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{Ll} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \tag{7}$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$); e T_s é a temperatura da superfície (K). A temperatura da superfície corresponde à imagem de temperatura fornecida pela NASA.

O valor de ϵ_0 foi calculado por equações empíricas, sugeridas por Allen *et al.* (2002). Para tanto, foram considerados dois índices de vegetação: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Leaf Area Index* (LAI).

Quando $\text{NDVI} > 0$ e $\text{LAI} < 3$, utilizou-se:

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot \text{LAI} \quad (8)$$

Para $\text{LAI} > 3$, o valor para ϵ_0 foi adotado como 0,98. No caso específico da água, quando $\text{NDVI} < 0$, ϵ_0 adotado foi de 0,985.

O NDVI foi calculado pela normalização da diferença entre os valores de reflectância das bandas do vermelho visível e infravermelho próximo:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_3 - \rho_2)}{(\rho_3 + \rho_2)} \quad (9)$$

onde ρ_2 e ρ_3 são as reflectâncias da superfície corrigidas dos efeitos atmosféricos referentes às bandas 2 (vermelho visível) e 3 (infravermelho próximo), respectivamente.

Para cálculo do LAI, primeiramente foi necessário gerar o índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI), que é adimensional. Este índice visa minimizar os efeitos do solo a partir do NDVI, de modo que o impacto da umidade do solo seja reduzido, e foi calculado por:

$$\text{SAVI} = \frac{(\rho_3 - \rho_2)(1+L)}{(\rho_3 + \rho_2 + L)} \quad (10)$$

onde L é o fator de ajuste ao solo. Para o L foi adotado 0,5 que, segundo Ponzoni & Shimabukuro (2010), corresponde ao valor ideal para vegetação de densidade média. Como nas imagens há áreas de vegetação densa representativas, mas também de solo exposto, optou-se pela escolha de um valor intermediário. Por fim, o LAI foi estimado com base em Allen *et al.* (2002):

$$\text{LAI} = \frac{-\ln\left(\frac{0,69 - \text{SAVI}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (11)$$

O valor de $R_{L\downarrow}$ também foi calculado pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (12)$$

onde ϵ_a é a emissividade da atmosfera (adimensional); e T_a é a temperatura do ar (K). ϵ_a foi calculada de acordo com Allen *et al.* (2002), que adotam a equação:

$$\epsilon_a = 0,85(-\ln\tau_{sw})^{0,09} \quad (13)$$

Em função da importância da aplicabilidade de R_n em escala diária (e.g. como dado de entrada em diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração), o mesmo foi estimado segundo de Bruin (1987):

$$R_{n24h} = (1 - \alpha_{sup}) \times R_{cl24h} - 110\tau \quad (14)$$

onde R_{n24h} é o saldo de radiação médio diário (W m^{-2}); R_{cl24h} é a radiação de ondas curtas incidente (W.m^{-2}), obtida pela média da radiação medida na estação meteorológica; e τ é a transmissividade da atmosfera. Para obtenção do saldo de radiação em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, R_{n24h} foi, por fim, multiplicado por 0,0864.

τ é a razão entre a radiação solar global diária (radiação média de ondas curtas que chega à superfície, medida na estação) e a radiação solar no topo da atmosfera (R_{toa}), que foi estimada pela Lei de Lambert:

$$R_{toa} = 37,586d_r(\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (15)$$

em que δ é a declinação solar (rad); ω_s ângulo horário do pôr do sol (rad); e φ é a latitude (rad).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos resultados do SEBAL foram extraídas informações de polígonos (amostras) de classes representativas de uso e cobertura do solo para a BARN. Sendo elas: água (rios, lagos naturais e artificiais, entre outros), solo exposto claro (solo descoberto em época de preparo para o plantio e estradas sem pavimentação), solo exposto escuro (áreas com plantios recentes e solo preparado para plantio), área urbana (áreas construídas e estradas pavimentadas), floresta nativa (Floresta Ombrófila Mista, em diferentes estágios de desenvolvimento e de regeneração), reflorestamento (plantios de pinus em diferentes idades crescimento), agricultura (diferentes tipos de culturas anuais).

A Tabela 2 mostra os valores mínimo, máximo, médio e coeficiente de variação dos principais parâmetros utilizados no cálculo do R_n . Para o al-

bedo, as diferentes classes seguiram uma tendência normal em relação ao comportamento espectral dos alvos. Os menores valores foram observados para a água, seguida das áreas de vegetação e, por fim, os valores mais altos para áreas de solo exposto. O solo exposto escuro apresentou um albedo médio de 0,15, indicando, por exemplo, a presença de vegetação em estágio inicial de desenvolvimento ou solo preparado para plantio. Áreas de agricultura e pastagem obtiveram valores próximos de 0,23 e 0,22, respectivamente. Estes são valores mais elevados do que os das áreas com vegetação mais densa e de porte maior, como floresta nativa (0,15) e reflorestamento (0,14).

As regiões de vegetação densa resultaram em SAVI mais elevados. Assim, o SAVI variou de 0,33 a 0,74, com média de 0,54 para floresta nativa, e entre 0,28 e 0,80, com média de 0,55 para reflorestamento. As áreas de pastagem e agricultura apresentaram os valores menos elevados. Nas áreas de solo exposto (claro e escuro) os valores mais elevados de SAVI podem estar relacionados à presença de vegetação esparsa e de pequeno porte, indicando a influência do solo na resposta espectral das imagens. Com relação às áreas urbanas, o SAVI médio foi de 0,20, com mínimo de -0,10 e máximo de 0,69. Em adição, apresentaram o maior coeficiente de variação dentre as classes de uso e cobertura do solo, o que pode ser justificado em função de as cidades presentes na bacia apresentarem diversas regiões com vegetação entre as construções. Os corpos hídricos apresentaram os menores valores de SAVI, com mínimo de 0,00, máximo de 0,28 e média de 0,05.

Os maiores valores de R_{NS} corresponderam às classes com menor albedo. Como a radiação solar foi considerada constante sobre todas as cenas, os objetos com menor perda de radiação de ondas curtas por reflexão retêm maior quantidade de energia na superfície. O máximo valor de R_{NS} de 734 $W m^{-2}$ foi encontrado na água. Os maiores valores médios foram relacionados às áreas de água, floresta nativa, reflorestamento e solo exposto escuro (724, 629, 629 e 618 $W m^{-2}$, respectivamente). Os menores valores foram observados nas áreas com menor densidade de biomassa (com SAVI positivo e mais próximo de zero) e com maior albedo. A área urbana apresentou o valor mínimo de 276 $W m^{-2}$. Esta classe e o solo exposto claro, obtiveram os menores R_{NS} médios, com 565 e 529 $W m^{-2}$ respectivamente.

Com relação ao R_{NL} , as maiores perdas foram observadas nas áreas com temperatura da superfície mais elevadas, baixa densidade de biomassa

e maior albedo. Isto favorece uma maior perda de radiação para a atmosfera e, conseqüentemente, um menor armazenamento desta. Estas áreas corresponderam à área urbana, com média de 137 $W m^{-2}$ e solo exposto claro, com 129 $W m^{-2}$. Solo exposto escuro, água, floresta nativa e reflorestamento tiveram comportamento oposto e apresentaram menor perda de radiação de ondas longas. Estas áreas obtiveram média de 120, 108, 103 e 96 $W m^{-2}$. Agricultura e pastagem apresentaram os valores médios de 128 e 126 $W m^{-2}$, respectivamente.

A Tabela 3 e a Figura 3 mostram a análise estatística e a distribuição espacial do R_n da BARN para o momento de aquisição da imagem de satélite. Observa-se que, para cada classe de uso e cobertura do solo, a mediana está muito próxima sua média. Portanto, considera-se que os valores das médias são representativos da tendência de comportamento do R_n . Os valores de CV indicam que as áreas mais homogêneas foram a água, a floresta nativa e o reflorestamento. As regiões com maior CV representam as áreas com maior mistura espectral dos pixels e maior amplitude de valores de R_n , abrangendo a agricultura, pastagem, solo exposto claro e a área urbana.

Dentre todas as classes de uso e cobertura do solo, a água apresentou o maior valor médio de R_n (610 $W m^{-2}$) (Tabela 3). Este comportamento está dentro do esperado, visto que essas áreas possuem os menores valores de albedo, refletindo uma menor porcentagem da radiação de ondas curtas, que, em conjunto com uma menor perda por radiação de ondas longas em função de apresentarem as menores temperaturas, favorece a disponibilidade da energia na forma de saldo de radiação.

Na Figura 3 os *pixels* em tons de cinza mais claros correspondem predominantemente às áreas de vegetação mais densa. Estas, apresentaram os maiores valores médios de R_n (532 $W m^{-2}$ para reflorestamento e 526 $W m^{-2}$ para floresta nativa). A classe de solo exposto escuro também apresentou R_n elevado (498 $W m^{-2}$), devido ao maior conteúdo de umidade no solo. Os valores intermediários, em tom de cinza escuro são, em média, 444 $W m^{-2}$ para agricultura e 451 $W m^{-2}$ para pastagem.

Na Tabela 3, observam-se os menores valores médios para as áreas de solo exposto claro e áreas urbanas (404 e 429 $W m^{-2}$, respectivamente), que apresentam-se predominantemente em, tom de cinza escuro na Figura 3. Estas classes possuem características opostas a dos corpos hídricos, correspondendo às áreas com maior perda de energia por reflexão e emissão.

Tabela 2 - Valor mínimo, máximo, média e coeficiente de variação (CV) dos principais parâmetros utilizados no cálculo do R_n .

		Água	Solo Exposto Claro	Solo Exposto Escuro	Área Urbana	Floresta Nativa	Reflorestamento	Agricultura	Pastagem
Albedo	Mínimo	0,02	0,15	0,08	0,09	0,07	0,03	0,10	0,08
	Máximo	0,10	0,40	0,28	0,46	0,25	0,37	0,38	0,33
	Média	0,04	0,27	0,15	0,24	0,15	0,14	0,23	0,22
	CV (%)	14	13	15	18	13	16	14	16
SAVI	Mínimo	0,00	0,02	0,11	-0,10	0,33	0,28	0,24	0,22
	Máximo	0,28	0,63	0,56	0,69	0,74	0,80	0,84	0,80
	Média	0,05	0,22	0,22	0,20	0,54	0,55	0,57	0,50
	CV (%)	42	29	19	51	9	11	17	13
T (K)	Mínimo	291	289	289	292	289	288	291	290
	Máximo	305	312	310	312	305	310	311	306
	Média	295	296	296	300	293	292	298	297
	CV (%)	1	1	1	1	1	1	1	1
R_{ns} ($W m^{-2}$)	Mínimo	675	413	542	276	540	347	466	485
	Máximo	734	636	684	680	696	705	676	662
	Média	724	529	618	565	629	629	572	577
	CV (%)	1	5	4	6	4	4	5	5
R_{nL} ($W m^{-2}$)	Mínimo	-164	-204	-193	-214	-165	-195	-201	-172
	Máximo	-86	-86	-86	-97	-84	-81	-91	-93
	Média	-108	-129	-120	-137	-103	-96	-128	-126
	CV (%)	10	11	14	11	7	9	13	9

Tabela 3 - Saldo de radiação para os diferentes usos e coberturas do solo da BARN.

Uso e cobertura do solo	Saldo de Radiação				
	Mínimo ($W m^{-2}$)	Máximo ($W m^{-2}$)	Média ($W m^{-2}$)	Mediana ($W m^{-2}$)	CV (%)
Água	555	614	610	614	1
Solo Exposto Claro	321	518	404	404	7
Solo Exposto Escuro	390	585	498	499	6
Área Urbana	228	542	429	431	8
Floresta Nativa	418	593	526	529	4
Reflorestamento	338	612	532	532	4
Agricultura	338	560	444	445	7
Pastagem	341	536	451	448	7

Pelo histograma também foi observada uma concentração maior de número de *pixels* com R_n característico das áreas com maior cobertura da bacia, ou seja, vegetação nativa (que variou de 418 a 593 $W m^{-2}$, com mediana de 529 $W m^{-2}$) e reflorestamento (que variou de 338 a 612 $W m^{-2}$, com mediana de 532 $W m^{-2}$) (Figura 4).

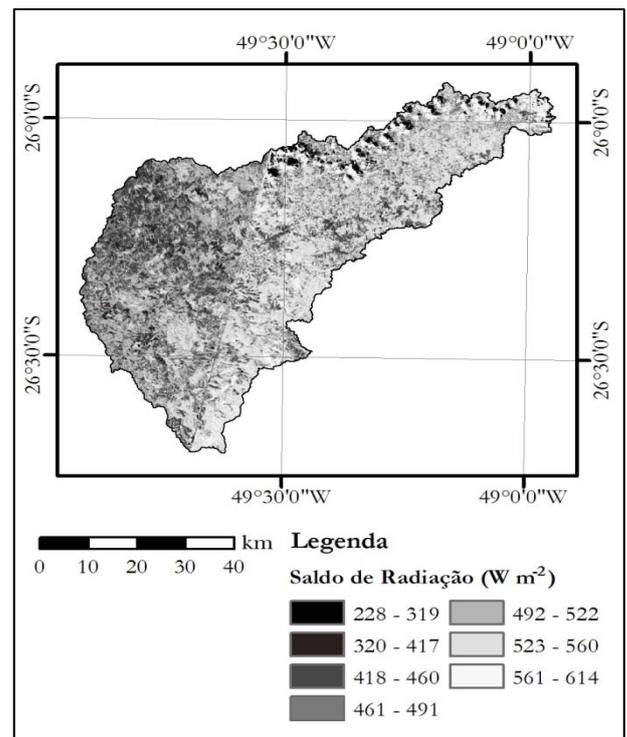


Figura 3 - Saldo de radiação da BARN.

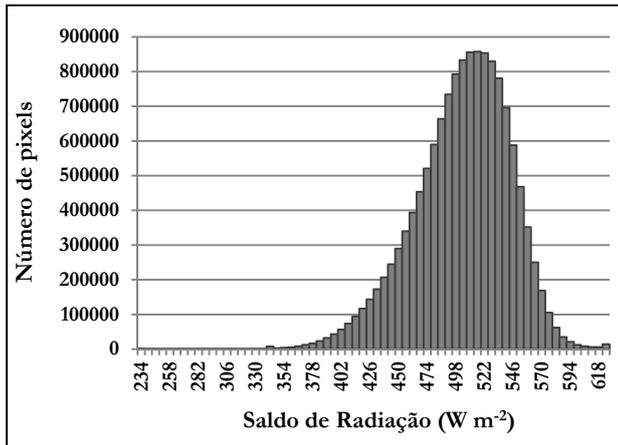


Figura 4 - Histograma de frequência do saldo de radiação à superfície.

Leivas (2008), a partir de imagens ASTER aplicadas ao SEBAL, obteve o saldo de radiação em áreas testes no Rio Grande do Sul. Uma das cenas abrangia 35 municípios localizados na Serra do Nordeste, em clima Cfb. Já Santos *et al.* (2010) aplicaram uma cena do mesmo sensor para estimar a evapotranspiração por meio do SEBAL. A área de estudo abrangeu uma região do município de Paraíso do Sul – RS, com cultivo de arroz irrigado, solo exposto com vegetação esparsa, vegetação nativa de baixo porte e corpos hídricos. Constata-se que os valores de R_n obtidos no presente estudo corroboram com os apresentados pelos autores citados (Tabela 4):

Tabela 4 - Saldo de radiação obtido por Leivas (2008) e Santos *et al.* (2010).

Uso e cobertura	Leivas (2008)	Santos <i>et al.</i> (2010)
	R_n médio ($W m^{-2}$)	Amplitude de R_n ($W m^{-2}$)
Água	605	> 700
Solo Exp. Claro	488	269 - 670
Solo Exp. Escuro	488	269 - 670
Área Urbana	513	
Floresta Nativa		
Reflorestamento		
Agricultura	505	
Pastagem		

A Figura 5 apresenta o saldo de radiação médio diário da BARN. Como esperado, o padrão da distribuição espacial de R_{n24h} é idêntico ao de R_n . Os valores mais baixos, predominantemente

entre 8,6 e 9,4 $MJ m^{-2} dia^{-1}$, prevalecem nas áreas com maior influência antrópica (áreas urbanas e solos expostos). Os valores mais elevados, chegando a R_{n24h} superiores a 12,0 $MJ m^{-2} dia^{-1}$, são atribuídos aos corpos hídricos. Observa-se uma ampla incidência de valores entre 9,5 e 10,9 $MJ m^{-2} dia^{-1}$, expressando a predominância da cobertura vegetal da bacia.

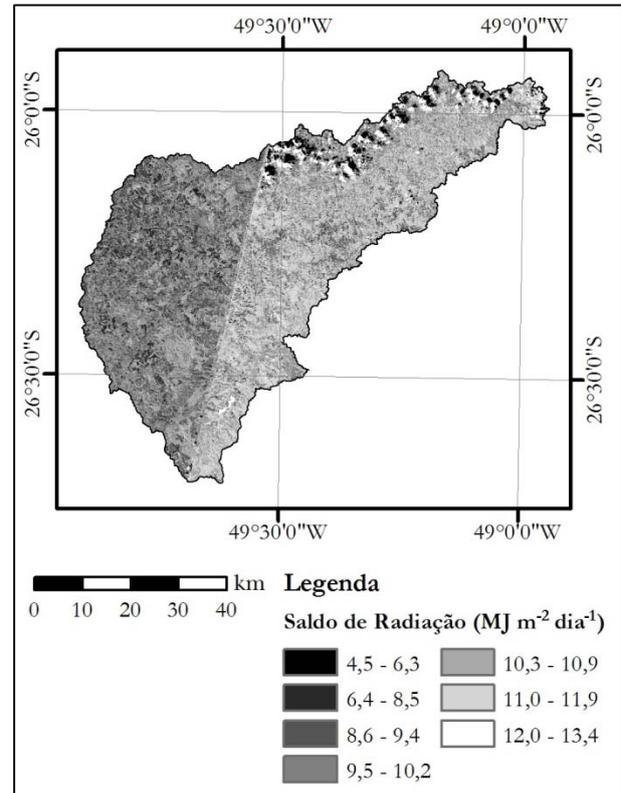


Figura 5 - Saldo de radiação médio diário da BARN.

CONCLUSÕES

O uso de imagens do sensor ASTER integradas ao SEBAL possibilitaram estimar o saldo de radiação à superfície com resultados dentro da magnitude esperada para as diversas coberturas do solo.

Para as classes de uso e cobertura do solo analisados na bacia do alto Rio Negro, foram identificados diferentes padrões de comportamento do saldo de radiação. Os maiores valores de R_n foram encontrados nas áreas com menor influência antrópica (água, floresta nativa e reflorestamento), que correspondem a mais de 70% da área da bacia. Os

menores valores foram identificados para solo exposto claro (solo descoberto em época de preparo para o plantio e estradas sem pavimentação) e área urbana (áreas construídas e estradas pavimentadas).

Entende-se que, para melhor verificação da acurácia da metodologia aplicada, haveria a necessidade obtenção de medições em superfície no momento coincidente com o de aquisição da imagem de satélite. Apesar disso, o SEBAL possui um grande potencial de uso, uma vez que permite verificar a variabilidade espacial dos componentes do balanço de radiação e energia com imagens de alta resolução espacial. Isso permite sua aplicação para estimar a evapotranspiração distribuída espacialmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), pelo fornecimento dos dados meteorológicos, à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), pela disponibilização das cartas topográficas digitais e ao *Earth Resources Observation and Science* (EROS) Center, *Sioux Falls, South Dakota*, pelo fornecimento das imagens ASTER. Em adição, agradecem aos dois revisores anônimos pelas valiosas sugestões e comentários.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; TREZZA, R.; TASUMI M.; WATERS, R. Surface energy balance algorithms for land - Advance training and user's manual, version 1.0, p. 98, 2002.
- BASTIAANSSEN, 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.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; BANDARA, K.M.P.S. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. *Irrigation Science*, v. 21, p. 1-15, 2001.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212, p. 198-212, 1998.
- DE BRUIN, H.A.R. From Penman to Makkink', in Hooghart, C. (Ed.), *Evaporation and Weather, Proceedings and Information*. Comm. Hydrological Research TNO, The Hague. p. 5-30, 1987.
- DI PACE, F.T.; SILVA, B.B. da; SILVA, V. de P.R. da; SILVA, S.T. A. da. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n. 4, p. 385-392, 2008.
- EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA S.A. (EPAGRI) / CENTRO DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS AMBIENTAIS E DE HIDROMETEOROLOGIA DE SANTA CATARINA (CIRAM). Zoneamento Agroecológico. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/agricultura/zoneAgroecologico.jsp&tipo=agricultura>>. Acesso em: junho de 2009.
- FOLHES, M.T. RENNÓ; C.D.; SOARES; J.V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, v.96, p. 1398-1408, 2009.
- FRENCH, A.N; JACOB, F; ANDERSON, M.C; KUSTAS, W.P.; TIMMERMANS, W.; GIESKE, A.; SU, Z.; SU, H.; MCCABE, M.F.; LI, F.; PRUEGER, J.; BRUNSELL, N. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). *Remote Sensing of Environment*, v.99, p. 55-65, 2005.
- 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. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v.28, n. 2, p. 153-164, 2009.
- KARATAS B.S.; AKKUZU, E.; UNAL, HB, ASIK S, AVCI M. Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in water user associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. *Agricultural Water Management*, v.96, p. 982-990, 2009.
- HAFEEZ, M.M.; CHEMIN, Y.; GIESEN, N.; BOUMAN, B.A.M. Field evapotranspiration estimation in Central Luzon, Philippines, using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster.

Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa: 2002.

LEIVAS, J.F. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa do balance de radiação na superfície. 107f. Tese. (Doutorado em Fitotecnia com ênfase em Agrometeorologia). UFRGS. Porto Alegre, 2008.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. Part I: Algorithms. Remote Sensing of Environment, n. 76, issue 3, p. 213-238, 2000.

MOHAMED, Y.A.; BASTIAANSEN, W.G.M.; SAVENIJE, H.H.G. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. Journal of Hydrology, v.287, p. 145-164, 2004.

PEREIRA, A.R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FAELQ, 1997.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura – EPA-GRI/CIRAM. Dados e Informações Biofísicas da Unidade de Planejamento Regional do Planalto Norte Catarinense. Florianópolis, 2002.

SILVA, B.B. da; 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, p. 243-252, 2005.

SANTOS, T.V. dos; FONTANA, D.C.; ALVES, R.C.M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.45, n. 5, p. 488-496, 2010.

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

WANG, J.; SAMMIS, T.W.; MEIER, C.A.; SIMMONS, L.J.; MILLER, D.R.; SAMANI, Z.A modified SEBAL

model for spatially estimating pecan consumptive water use for Las Cruces, New Mexico. 15th Conference on Applied Climatology, Georgia, 2005.

Mapping Net Radiation In The Upper Rio Negro Watershed, In Southern Brazil

ABSTRACT

The upper Rio Negro watershed (3454 km²) is located between the Santa Catarina Northern Plateau and the First Plateau of Paraná. The study of mass and energy fluxes between the surface and the atmosphere allows the analysis of the influence of land-uses on the climate of the region. Hence, the objective of the present study was to map net radiation using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), in the upper Rio Negro watershed, using Advanced Spaceborne Thermal and Emission Radiometer (ASTER) images. These images have refined spatial resolution in the visible, near-infrared and thermal-infrared regions (15 m, 30 and 90 m, respectively). The SEBAL was applied with climatic data from a ground station and five ASTER images, two dated April 13th and three dated April 22th, 2006. For the net radiation analysis, land use type polygons (representative samples) were selected. The water had the highest mean Rn value (610 Wm²). Dense vegetation areas resulted in high Rn values (532 Wm² for reforestation and 526 Wm² for native forest), dark bare soil (498 Wm²). Agriculture and pasture had intermediate Rn values of 444 Wm² and 451 Wm². The lowest mean values were observed for light bare soil and urban areas (404 and 429 Wm², respectively), corresponding to areas with the higher energy losses by reflection and emission.

Key-words: net radiation, SEBAL, ASTER, land use, upper Rio Negro watershed.