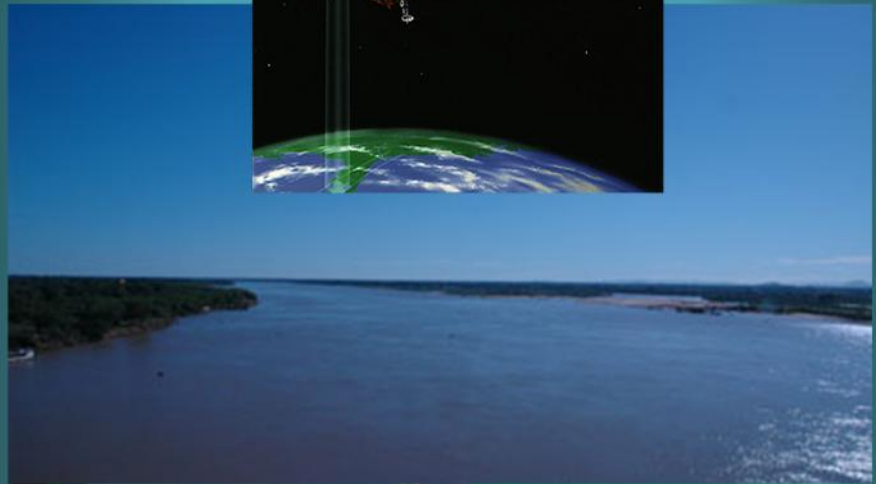


Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro



ISSN 0103-7811
Outubro, 2013

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Monitoramento por Satélite
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 99

Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro

*Antônio Heriberto de Castro Teixeira
Fernando Braz Tangerino Hernandez
Hélio Leandro Lopes
Morris Scherer-Warren
Luís Henrique Bassoi*

Embrapa Monitoramento por Satélite
Campinas, SP
2013

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Monitoramento por Satélite

Av. Soldado Passarinho, 303 – Fazenda Chapadão

CEP 13070-115 Campinas, SP

Fone: (19) 3211-6200

Fax: (19) 3211-6222

E-mail: cnpm.sac@embrapa.br

www.cnpm.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Cristina Criscuolo

Secretária-Executiva: Bibiana Teixeira de Almeida

Membros: Daniel Gomes dos Santos Wendriner Loebman, Fabio Enrique Torresan, Janice Freitas Leivas, Ricardo Guimarães Andrade, Shirley Soares da Silva e Vera Viana dos Santos

Supervisão editorial: Cristina Criscuolo

Revisão de texto: Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica: Vera Viana dos Santos

Diagramação e editoração eletrônica: Shirley Soares da Silva

Foto da capa e internas: Antônio Heriberto de Castro Teixeira

1ª edição

Versão eletrônica (2013)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Monitoramento por Satélite

Teixeira, Antônio Heriberto de Castro.

Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro / Antônio Heriberto de Castro Teixeira, Fernando Braz Tangerino Hernandez, Hélio Leandro Lopes, Morris Scherer-Warren, Luís Henrique Bassoi. – Campinas, SP : Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013.

32 p.: il. (Documentos / Embrapa Monitoramento por Satélite; 99).

ISSN 0103-7811.

1. Agrometeorologia. 2. Hidrologia. 3. Mudanças climáticas. I. Hernandez, Fernando Braz Tangerino. II. Lopes, Hélio Leandro. III. Scherer-Warren, Morris. IV. Bassoi, Luís Henrique. V. Título. VI. Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite (Campinas, SP). VII. Série.

CDD 551.57

Autores

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Engenheiro Agrônomo, Ph.D. em Ciências Ambientais, pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas-SP
heriberto.teixeira@embrapa.br

Fernando Braz Tangerino Hernandez

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, professor da UNESP, Ilha Solteira-SP
fbthtang@agr.feis.unesp.br

Hélio Leandro Lopes

Engenheiro Agrônomo, M.Sc. em Geociências, professor da UNIVASF, Petrolina-PE
heliovasf@hotmail.com

Morris Scherer-Warren

Geógrafo, Doutor em Recursos Hídricos da ANA, Brasília-DF
morris@ana.gov.br

Luís Henrique Bassoi

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Semiárido, Petrolina-PE
luis.bassoi@embrapa.br

Sumário

Introdução	07
Região de estudo e dados climáticos	09
Modelagem do balanço de energia em larga escala	10
Princípios e calibrações locais do modelo Sebal.....	10
Equações e calibrações para o primeiro passo do Sebal	10
Equações e calibrações para o segundo passo do Sebal	14
Descrição do modelo Safer	17
Comparação entre os modelos Sebal e Safer	20
Obtenção dos componentes do balanço de energia no Semiárido brasileiro	23
Evapotranspiração na escala do município	23
Evapotranspiração mensal no Município de Petrolina	23
Evapotranspiração diária e anual no Município de Juazeiro	25
Balanço de energia na escala do distrito de irrigação	26
Considerações finais	28
Referências	29

Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Fernando Braz Tangerino Hernandez

Hélio Leandro Lopes

Morris Scherer-Warren

Luís Henrique Bassoi

Introdução

As dificuldades de medição dos fluxos de energia em agroecossistemas por meio de experimentos de campo fazem do sensoriamento remoto por satélite uma ferramenta importante, a qual tem sido aplicada em regiões climáticas distintas, na determinação e no mapeamento da estrutura espacial e temporal dos componentes dos balanços de energia e de água (ANDERSON et al., 2012; BASTIAANSSEN et al., 2008; MIRALLES et al., 2011; PÔÇAS et al., 2013; TANG et al., 2009; TEIXEIRA, 2010).

Modelos hidrológicos podem ser muito complexos e caros para serem usados em decorrência da dificuldade na disponibilidade de dados em diferentes agroecossistemas (MAJUMDAR et al., 2007). Vários modelos que usam técnicas de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidos, grande parte deles com base nas teorias do balanço de energia. Esses apresentam vantagens e desvantagens (BASTIAANSSEN et al., 1998; ROERINK et al., 2000; SU, 2002), e podem ser aplicados em vários agroecossistemas sem a necessidade de classificação de culturas, que é considerada difícil de ser efetuada em uma mistura de espécies vegetais.

Uma das desvantagens de alguns métodos baseados no balanço de energia por sensoriamento remoto, como o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – Sebal – (BASTIAANSSEN et al., 1998) e o *Surface Energy Balance System* – Sebs – (SU, 2002), está na necessidade da identificação de condições hidrológicas extremas em uma imagem. Outro problema com relação à aplicação desses modelos está na aplicabilidade, quando se almeja os usuários finais, em decorrência da necessidade de conhecimentos da física da radiação.

A aplicação da equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), por sensoriamento remoto com imagens de satélites, tem sido demonstrada por meio da combinação de índices de vegetação e dados climáticos (CLEUGH et al., 2007) com o modelo *Mapping Evapotranspiration with High Resolution and Internalized Calibration* – Metric – (ALLEN et al., 2007), o qual faz uso da razão entre a evapotranspiração atual (ET) e a de referência (ET₀) para extrapolação de valores da ET no momento da passagem do satélite na região de interesse para escalas de tempo maiores.

Embora o tão conhecido modelo Sebal tenha sido calibrado e validado por meio de experimentos com balanço de energia em campo, apresentando desempenho favorável nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a), a maior dificuldade para as estimativas dos fluxos hídricos e de energia, para as diferentes condições durante o ano, reside na consideração do pixel quente durante o período chuvoso de uma região, pois nesse período todas as espécies dos ecossistemas mistos compostos de culturas irrigadas e vegetação natural estão em condições de umidade homogêneas na zona das raízes, e apresentam elevadas taxas evapotranspiratórias com condições térmicas favoráveis.

Considerando-se a simplicidade de aplicação e a ausência da necessidade de classificação da vegetação e identificação das condições hidrológicas extremas, um modelo para a obtenção da ET foi desenvolvido. O *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving – Safer –*, baseado na modelagem da razão ET/ET_0 , já foi validado por meio de dados provenientes de quatro experimentos de campo envolvendo culturas irrigadas e vegetação natural nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA, 2012a). Um segundo modelo biofísico também foi elaborado para a mesma região, o qual permite a obtenção da resistência da superfície aos fluxos hídricos (r_s) e é útil para a separação das culturas irrigadas e da vegetação natural (TEIXEIRA, 2012b).

A utilização conjunta desses dois modelos em imagens de diferentes resoluções espaciais e temporais permitiu obter a ET em larga escala de maneira operacional nas condições semiáridas brasileiras. Adicionalmente, a estimativa do saldo de radiação (R_n) por meio da equação de Slob (BRUIN DE; STRICKER, 2000; TEIXEIRA et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2009a), do modelo Safer e da r_s também tornou possível a quantificação do fluxo de calor sensível (H) em ecossistemas mistos naquelas condições.

O Safer tem ainda a vantagem adicional do uso de dados de ambos os tipos de estações agrometeorológicas, convencionais e automáticas. Essa característica é importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia e da produtividade da água em larga escala ao longo dos anos, visto que sensores automáticos são avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental.

Considerando-se a recente elaboração do Safer, não existem muitos estudos comparativos de avaliação do seu desempenho. Hernandez et al. (2013) recentemente compararam os modelos Sebal e Safer com a metodologia tradicional do cálculo do requerimento hídrico utilizando de coeficientes de cultura da *Food and Agricultural Organization – FAO –* (ALLEN et al., 1998). Os métodos por sensoriamento remoto e os manejos de água nas culturas de milho, feijão e cana-de-açúcar, irrigadas por pivôs centrais, foram avaliados no noroeste de São Paulo. Os autores concluíram que os valores da ET de ambos os modelos foram mais elevados que a quantidade de água aplicada, e que as superestimativas estão relacionadas aos erros nas considerações dos estágios fenológicos, porém com o Safer tendo melhor desempenho que o Sebal em condições de menor índice de área foliar.

Este trabalho objetivou realizar um estudo comparativo de desempenho entre o Safer e o Sebal em relação à capacidade de quantificação da variação espaçotemporal da ET usando a metodologia da FAO como referência e, após a avaliação da confiabilidade do novo modelo Safer, verificar a aplicabilidade do seu uso para subsidiar o monitoramento do efeito das mudanças de uso da terra nos processos de troca de energia e de água utilizando dados de estações agrometeorológicas e imagens de satélites.

A estrutura do documento é a seguinte: após a introdução, são descritos a região de estudo, os dados utilizados e os passos para a modelagem; uma comparação preliminar entre o Safer e o Sebal é feita então, tomando-se como referência as estimativas de requerimento hídrico utilizando a metodologia da FAO; em seguida, após comprovação de eficiência, são mostrados resultados da aplicação do Safer em culturas irrigadas e em vegetação natural com utilização de satélites com diferentes resoluções espaciais e temporais na região semiárida brasileira.

Região de estudo e dados climáticos

A Figura 1 apresenta as localizações dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), do distrito de irrigação Nilo Coelho e das estações agrometeorológicas conjuntamente com fotografias dos principais tipos de vegetação envolvidos no atual estudo na região semiárida do Brasil.

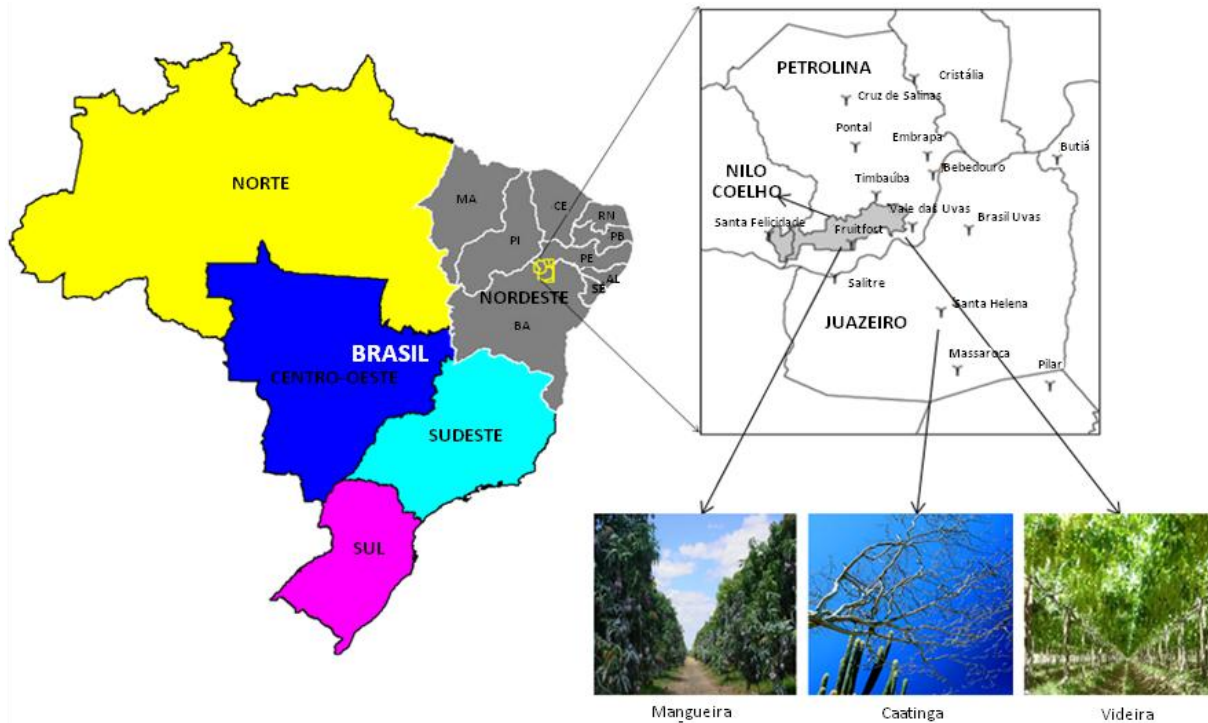


Figura 1. Localização da região semiárida brasileira estudada, com destaques para os municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), o distrito de irrigação Nilo Coelho, as estações agrometeorológicas e os principais agroecossistemas.

A região semiárida do Brasil, cuja maior parte é situada no Nordeste, tem influência de correntes perturbadas de Sul, Norte, Leste e Oeste em sua climatologia. Excluídos os locais de altitude elevada, todas as áreas apresentam temperaturas médias anuais do ar acima de 24 °C e mesmo maiores que 26 °C nas depressões com 200 m a 250 m de altitude. A média dos valores máximos é de 33 °C, enquanto, para os mínimos, é de 19 °C. Os valores médios mensais estão na faixa de 17 °C a 29 °C. O período chuvoso é concentrado de janeiro a abril, com picos ocorrendo em março (TEIXEIRA, 2009). No perímetro de irrigação Nilo Coelho, as menores quantidades de áreas irrigadas ocorrem em fevereiro, enquanto as maiores acontecem em junho (BASTIANSEN et al., 2001).

As principais culturas comerciais na região semiárida brasileira são pomares de mangas e parreirais. Essas culturas são circundadas por vegetação natural, a Caatinga (Figura 1). As mangueiras florescem e frutificam regularmente a cada ano. As videiras, em condições tropicais quentes, exibem processos fisiológicos contínuos e acelerados, diferentemente daquelas cultivadas em climas temperados. As espécies da Caatinga são definidas por possuírem aspectos arbustivos com folhas pequenas e espinhos distribuídas irregularmente na superfície do solo (TEIXEIRA, 2009).

As 15 estações agrometeorológicas apresentadas no lado superior direito da Figura 1 estão dentro de áreas irrigadas e de vegetação natural, e são equipadas com: piranômetros, para medição da radiação solar incidente (RS_{\downarrow}); sensores de temperatura (T_a) e umidade relativa do ar (UR); e sensores para medição da velocidade do vento (u). Essas medições permitem o cálculo da ET_0 pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) em larga escala.

As grades de RS_{\downarrow} , T_a e ET_0 foram usadas em conjunto com parâmetros obtidos a partir de imagens dos satélites Modis e Landsat, nos passos da modelagem dos componentes do balanço de energia em diferentes escalas espaciais e temporais.

Modelagem do balanço de energia em larga escala

Entre os modelos desenvolvidos para o cálculo da ET com imagens de satélites durante os anos recentes, o Sebal tem sido largamente utilizado em superfícies heterogêneas. Este modelo envolve a variabilidade espacial da maioria dos parâmetros agrometeorológicos, e pode ser aplicado em diversos ecossistemas. Entretanto, almejando simplicidade de aplicação, o Safer foi recentemente elaborado e validado no Brasil, e tem vantagens em termos de aplicabilidade com relação ao Sebal, já comentadas na introdução. Nas seções seguintes, os princípios e as descrições de ambos os modelos são apresentados para facilitar o entendimento das comparações e análises posteriores.

Princípios e calibrações locais do modelo Sebal

Equações e calibrações para o primeiro passo do Sebal

Neste documento, aplicações do modelo Sebal foram feitas por meio de imagens do Landsat 5 TM. O modelo requer valores de radiações espacialmente distribuídos nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal em conjunto com dados climáticos. No momento da passagem do satélite, computa-se R_n , o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor no solo (G) para cada pixel, e os valores do fluxo de calor latente (λE) são obtidos como resíduo na equação simplificada do balanço de energia:

$$R_n - \lambda E - H - G = 0 \quad (1)$$

onde todos os termos da Equação 1 são expressos em $W m^{-2}$.

A Figura 2 apresenta os passos das conversões das radiações espectrais nos valores de R_n por meio do uso de imagens de satélites.

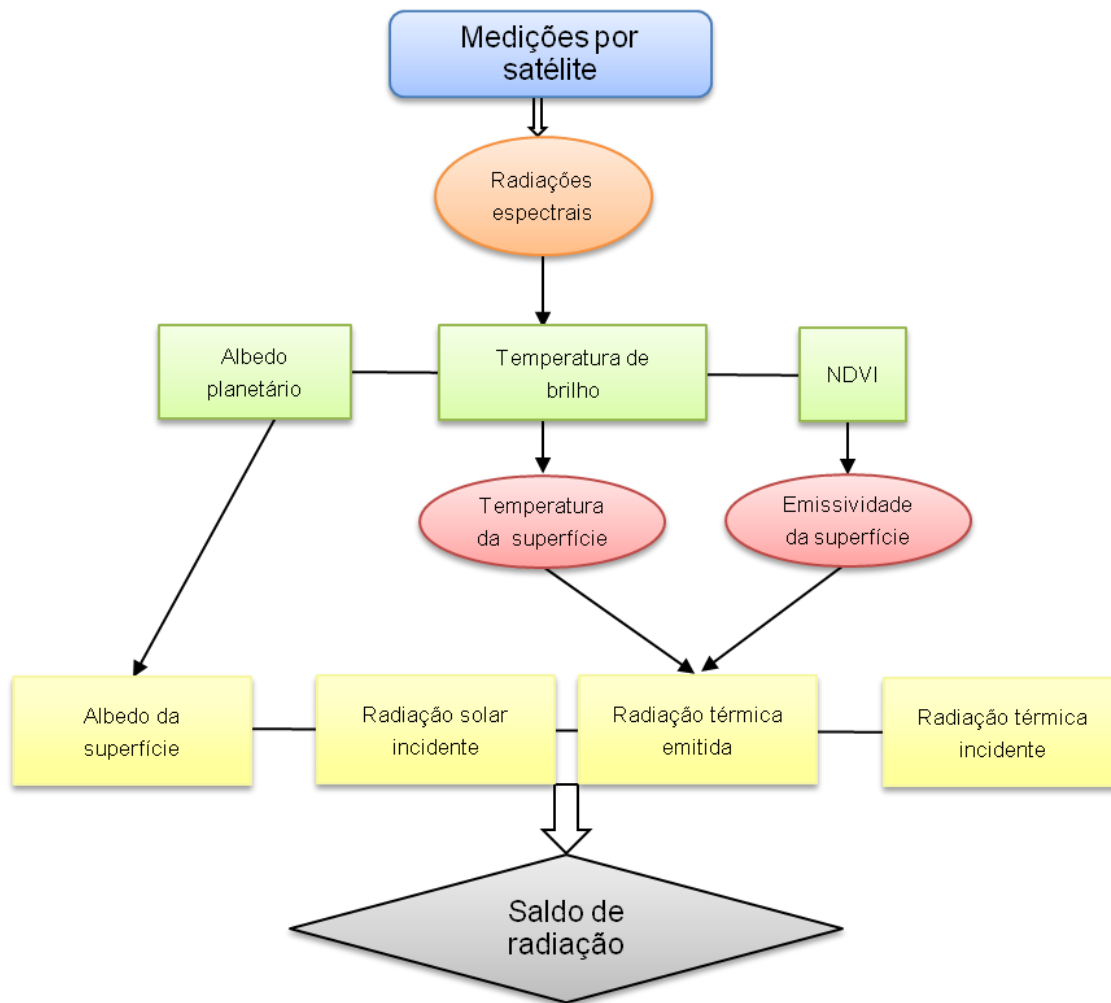


Figura 2. Fluxograma do balanço de radiação em larga escala para o primeiro passo do modelo Sebal.

O balanço de radiação é calculado por meio da seguinte equação:

$$R_n = RS \downarrow - \alpha_0 RS \downarrow - RL \uparrow + RL \downarrow \quad (2)$$

onde α_0 é o albedo da superfície; e $RL \uparrow$ e $RL \downarrow$ são as radiações de ondas longas emitida pela superfície e pela atmosfera ($W m^{-2}$), respectivamente.

As bandas de 1 a 5 e 7, com pixels de resolução espacial de 30 m, são usadas na obtenção do albedo planetário (α_p). Para o Landsat 5 TM, as radiações espectrais para cada banda (L_b) são computadas como:

$$L_b = \left[\frac{a - b}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}} \right] (DN - QCAL_{MIN}) + L_{MIN} \quad (3)$$

onde DN é o número digital para cada pixel, $QCAL_{MAX}$ e $QCAL_{MIN}$ são as mais altas e mais baixas faixas de valores para as radiações escaladas em DN, e a e b são constantes de calibração. As unidades para L_b são $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ e $QCAL_{MAX} = 255$ e $QCAL_{MIN} = 0$ para Landsat 5 TM.

No balanço de radiação, o saldo de radiação de ondas curtas na superfície da Terra depende de $RS\downarrow$ e α_0 . O segundo parâmetro é calculado a partir das radiações espectrais medidas pelo satélite para cada banda, seguido de expressões matemáticas para integração espectral e correções atmosféricas.

α_p , para cada banda do satélite (α_{p_b}), é calculada como:

$$\alpha_{p_b} = \frac{L_b \pi d^2}{R_{a_b} \cos \varphi} \quad (4)$$

onde d é a distância relativa Terra-Sol, R_{a_b} é a radiação solar média no topo da atmosfera para cada banda b ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) e φ é o ângulo zenital do sol. α_p é calculado como a soma dos valores de α_{p_b} para as diferentes bandas, de acordo com o peso de cada uma delas (w_b).

$$\alpha_p = \sum w_b \alpha_{p_b} \quad (5)$$

Os pesos para as diferentes bandas na Equação 5 são computados como a razão da quantidade de radiação de ondas curtas incidente em uma banda particular e a soma da radiação de ondas curtas para todas as bandas no topo da atmosfera.

A atmosfera interfere no sinal que chega ao sensor do satélite. Parte de $RS\downarrow$ é refletida de volta para o satélite antes da sua incidência na superfície da Terra. Uma combinação de medições de campo com cálculos de α_p por meio de medições pelo satélite Landsat 5 TM (TEIXEIRA et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2009a) resultou na relação linear seguinte para correções das perturbações atmosféricas:

$$\alpha_0 = a\alpha_p + b \quad (6)$$

onde $a = 0,61$ e $b = 0,08$ são os coeficientes de regressão para o momento da passagem do satélite encontrados nas condições semiáridas brasileiras para o período de imagens de 2001 a 2007, envolvendo diferentes condições climáticas (TEIXEIRA et al., 2009a).

Medições no momento do satélite Landsat 5 TM feitas por Teixeira et al. (2008) produziram valores instantâneos do albedo da superfície ($\alpha_{0_{inst}}$), as quais foram sistematicamente menores que aqueles para 24 horas ($\alpha_{0_{24}}$). Então, uma segunda equação de regressão foi necessária para conversão dos valores instantâneos em diários:

$$\alpha_{0_{inst}} = a\alpha_{0_{24}} + b \quad (7)$$

onde $a = 1,02$ e $b = 0,01$ foram os valores dos coeficientes de regressão encontrados nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a).

A Equação 7 foi considerada no cômputo dos valores diários de R_n , requeridos para a obtenção nos valores de λE nesta escala de tempo.

A radiação espectral da região termal do Landsat 5 (banda 6), com pixel de resolução espacial de 120 m, é convertida numa temperatura radiativa aplicável ao topo da atmosfera (T_{sat}) pela inversão da lei de Planck na faixa de ondas 10,4 μm – 12,5 μm . T_{sat} é calculada como:

$$T_{\text{sat}} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\text{b(Thermal)}}} + 1\right)} \quad (8)$$

onde $L_{\text{b(Thermal)}}$ é a radiação espectral da superfície não corrigida para a banda 6 e os coeficientes de conversão K_1 e K_2 são, respectivamente, $607,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $1.260,56 \text{ K}$ para Landsat 5 TM (SCHNEIDER; MAUSER, 1996).

De experimentos de balanço de energia (TEIXEIRA et al., 2008), as diferenças verticais de temperatura do ar (ΔT) entre duas alturas foram derivadas com o uso de dados de H , T_a acima de dosséis, e da resistência aerodinâmica (r_a) (SMITH et al., 1989).

$$\Delta T = \frac{H r_a}{\rho_a c_p} \quad (9)$$

onde ρ_a (kg m^{-3}) e c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) são a densidade do ar e o calor específico à pressão constante, respectivamente.

Experimentos têm demonstrado que, exceto para superfícies rasas como solo descoberto ou vegetação curta, existem diferenças entre as temperaturas radiométrica e aerodinâmica da superfície (TROUFLEAU et al., 1997), o que implica que a radiação termal medida pelos sensores a bordo dos satélites necessita de correção para ambas a emissão atmosférica e a diferença entre as temperaturas radiométrica e aerodinâmica. Para correção desses efeitos conjugados, os valores resultantes da Equação 9 foram usados para a obtenção de uma regressão linear entre T_0 ($T_0 = T_a + \Delta T$) e T_{sat} :

$$T_0 = aT_{\text{sat}} + b \quad (10)$$

onde os coeficientes $a = 1,07$ e $b = -20,17$ foram obtidos para as condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a).

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), o qual é um indicador relacionado com a cobertura vegetal da superfície, foi obtido por:

$$\text{NDVI} = \frac{\alpha_{\text{p(IP)}} - \alpha_{\text{p(VER)}}}{\alpha_{\text{p(IP)}} + \alpha_{\text{p(VER)}}} \quad (11)$$

onde $\alpha_{\text{p(IP)}}$ e $\alpha_{\text{p(VER)}}$ representam o albedo planetário nas faixas no comprimento de onda do infravermelho próximo (IP) e do vermelho do espectro solar, respectivamente.

$RS\downarrow$ foi medido nas estações agrometeorológicas representadas na Figura 1. $RL\downarrow$ pode ser calculada por meio da aplicação da equação de Stefan-Boltzmann com a emissividade atmosférica (ε_a) determinada empiricamente e dados de T_a (ALLEN et al., 1998). $RL\uparrow$ pode também ser obtido por meio da equação de Stefan-Boltzmann, com a emissividade da superfície (ε_0) determinada empiricamente e T_0 obtida pelo satélite após as correções atmosféricas (TEIXEIRA et al., 2009a; TEIXEIRA, 2010).

A equação de Stefan-Boltzmann aplicada ao momento da passagem do satélite para calcular $RL\downarrow$ é:

$$RL\downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (12)$$

onde σ ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) é a constante de Stefan-Boltzmann e T_a é em K.

ϵ_a foi calculada usando a seguinte equação:

$$\epsilon_a = a(-\ln \tau_s)^b \tag{13}$$

onde τ_s é a transmissividade atmosférica para ondas curtas, e os coeficientes de regressão são $a = 0,942$ e $b = 0,103$ para o momento da passagem do satélite, nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a; TEIXEIRA, 2010). A Equação 13 foi, então, aplicada nas imagens de satélite para obtenção de RL_{\downarrow} (Figura 2).

Valores de campo de $R_{L\uparrow}$ (TEIXEIRA et al., 2008) – em conjunto com estimativas de T_0 – deram a oportunidade da quantificação da emissividade termal da superfície (ϵ_0). Os valores de ϵ_0 foram correlacionados com os de NDVI:

$$\epsilon_0 = a \ln \text{NDVI} + b \tag{14}$$

onde a e b são coeficientes de regressão, respectivamente $0,06$ e $1,00$, nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a; TEIXEIRA, 2010).

Os valores de ϵ_0 foram usados na estimativa de RL_{\uparrow} (Figura 2) pela aplicação da Equação 12, permutando-se T_a e ϵ_a por T_0 e ϵ_0 .

Equações e calibrações para o segundo passo do Sebal

O segundo passo do modelo Sebal consiste no cômputo dos valores de G e H em larga escala, de acordo com a Figura 3.

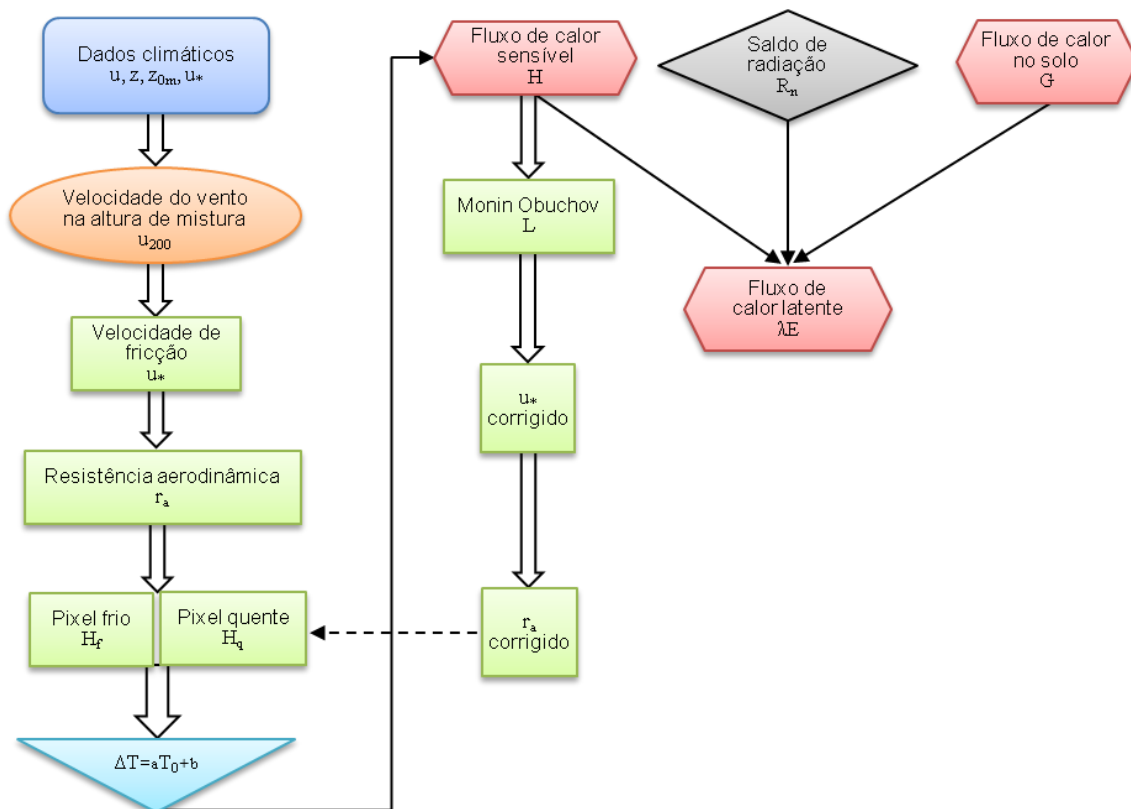


Figura 3. Fluxograma do balanço de energia em larga escala para o segundo passo do modelo Sebal.

Os valores de G para o momento da passagem do satélite são obtidos pela modelagem da razão G/R_n , enquanto aqueles para H são calculados usando os gradientes de temperatura na baixa superfície (ΔT). Valores iniciais da velocidade de fricção (u_*) são calculados considerando-se estabilidade atmosférica, com uso de dados provenientes de estações agrometeorológicas. A velocidade do vento (u) medida nessas estações é convertida a uma altura limite (altura de mistura), na qual os efeitos da rugosidade da superfície podem ser desprezados, e a qual pode ser considerada como 200 m (u_{200}). Os primeiros valores de u_* são usados em conjunto com estimativas da rugosidade da superfície para inferir os valores de r_a em larga escala. Correções para a estabilidade atmosférica são obtidas iterativamente para cada pixel. Uma série de iterações é requerida para a determinação dos valores corrigidos de u_* e r_a antes da estabilidade numérica (BASTIAANSEN et al., 1998).

O Sebal computa ΔT assumindo a relação linear desse gradiente com T_0 , e os coeficientes dessa relação são obtidos por meio de um procedimento de calibração interna (ALLEN et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2009a). O modelo usa dois pixels "âncora", nos quais o fluxo de calor sensível pode ser estimado sobre uma superfície seca (pixel quente, H_q) e sobre uma superfície úmida (pixel frio, H_f), por meio da aplicação da Equação 1 (Figura 3).

Valores do comprimento de rugosidade obtidos em campo para transferência de momentum (z_{0m}) envolvendo vegetação natural e culturas irrigadas (TEIXEIRA et al., 2008) foram usados na estimativa deste parâmetro em larga escala por meio de parâmetros obtidos por sensoriamento remoto de imagens do satélite Landsat 5 TM.

$$z_{0m} = \exp \left[\left(a \frac{\text{NDVI}}{\alpha_0} \right) + b \right] \quad (15)$$

onde z_{0m} é dado em metros, e os coeficientes de regressão para as condições semiáridas brasileiras foram $a = 0,26$ m e $b = -2,21$ (TEIXEIRA et al., 2009a).

Medições em campo de G e R_n (TEIXEIRA et al., 2008) foram usadas em conjunto com cálculos dos parâmetros T_0 , α_0 e NDVI por meio de medições do satélite Landsat 5 TM, para calibração da seguinte equação de regressão múltipla (BASTIAANSEN et al., 1998; TEIXEIRA et al., 2009a):

$$\frac{G}{R_n} = T_0 (a\alpha_0 + b) (1 - 0,98\text{NDVI}^4) \quad (16)$$

onde T_0 é em $^{\circ}\text{C}$ e a e b são coeficientes de regressão, os quais foram $a = -0,11$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $b = 0,02$, respectivamente, para as condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2009a).

Para o cômputo dos primeiros valores de H , a seguinte equação foi aplicada:

$$H = \frac{\rho_a c_p \Delta T}{r_a} \quad (17)$$

ΔT para cada pixel é dado como $(T_1 - T_2)$, e é a diferença de temperatura entre duas alturas (z_1 e z_2); a extrapolação em larga escala ocorre assumindo-se uma relação linear desse gradiente com T_0 :

$$\Delta T = aT_0 + b \quad (18)$$

onde a e b são coeficientes de regressão obtidos para cada imagem específica.

Originalmente, no pixel frio, H_f era desprezado e λE_f era calculado como resíduo na Equação 1, enquanto, no pixel quente, λE_q era de valor nulo (BASTIAANSSEN et al., 1998) e a mesma equação era aplicada para estimativa de H_q . Teixeira et al. (2009a) não desprezaram nenhum fluxo na equação simplificada do balanço de energia quando consideraram os pixels frio (pomar de mangas, irrigado) e seco (Caatinga). O pomar de mangas foi escolhido por representar a maior área irrigada na região de estudo, enquanto a vegetação natural do Semiárido brasileiro – a Caatinga – é o tipo de vegetação mais seco na região, onde em alguns períodos do ano a ET é quase zero. Como alternativa mais realista, os autores usaram valores específicos da razão da ET para ET_0 na Equação 1 para fazer estimativas dos fluxos naqueles pixels. Os valores de H nessas condições foram usados para inferir ΔT na Equação 17 no processo iterativo (Figura 3).

A força de dragagem entre a superfície e a atmosfera é representada pelos valores de r_a , e a quantificação dessa resistência requer as condições de rugosidade da superfície (z_{0h}) e a velocidade de fricção (u_*):

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{(z-d)}{z_{0h}}\right] - \Psi_h((z-d)/L)}{ku_*} \quad (19)$$

onde z_{0h} (m) é o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor d'água da superfície para a atmosfera; k é a constante de Von Karman (0,41); z (m) é uma altura de referência; d (m) é o deslocamento do plano zero, tomado como $4,67z_{0m}$; Ψ_h é uma correção da estabilidade atmosférica decorrente de diferenças de densidade do ar; e L (m) é o comprimento de Obukhov.

A teoria da similaridade na camada de interface superfície/atmosfera foi aplicada, com o uso das funções universais sugeridas por Businger et al. (1971), a soluções das funções de estabilidade integradas de temperatura (Ψ_h) e de momentum (Ψ_m).

As expressões seguintes foram usadas para situações de instabilidade atmosférica:

$$\Psi_h = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right), \text{ com } x = \left(1 - 16 \frac{z-d}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (20)$$

$$\Psi_m = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

Para situações de estabilidade atmosféricas, considerou-se:

$$\Psi_h = \Psi_m = -5 \frac{z-d}{L} \quad (22)$$

onde L foi calculado como:

$$L = - \frac{\rho_a c_p u_*^3 T_a}{k g H} \quad (23)$$

e u_* , expresso em $m s^{-1}$, é dado por:

$$u_* = \frac{uk}{\ln \left[\frac{z-d}{z_{0m}} \right] - \Psi_m} \quad (24)$$

onde u foi considerado como a velocidade do vento na altura de mistura de 200 m ($m s^{-1}$) e Ψ_m , a correção de estabilidade para momentum nesta altura.

De acordo com Bastiaanssen et al. (1998), após os cálculos para os valores instantâneos de λE , a fração evaporativa para o momento da passagem do satélite [$EF = \lambda E / (R_n - G)$] é multiplicada pelo saldo de radiação diário ($R_{n_{24}}$) para a obtenção do fluxo de calor latente para 24 horas (λE_{24}).

$$\lambda E_{24} = EF_{inst} R_{n_{24}} \quad (25)$$

onde EF_{inst} é a razão de λE para a energia disponível no momento da passagem do satélite.

Com base em dados de campo, Teixeira et al. (2008, 2009a) reportaram a necessidade de um fator de correção de 1,18 para extrapolação dos valores da EF instantâneos para diários, nas condições semiáridas brasileiras.

Os valores diários de R_n podem ser descritos pelos de saldo de radiação de ondas curtas para 24 horas, por meio da equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0) RS \downarrow - a_1 \tau_s \quad (26)$$

onde a_1 é um coeficiente de regressão da relação entre o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) e a transmissividade atmosférica de ondas curtas (τ_s) na escala diária (BRUIN DE; STRICKER, 2000; TEIXEIRA et al., 2008). τ_s pode ser calculado pela razão de $RS \downarrow$ medida por piranômetros e a radiação solar no topo da atmosfera (R_a).

Descrição do modelo Safer

Neste documento, uma descrição do modelo Safer é apresentada para uso com imagens *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* – Modis – e Landsat 5 TM. A Figura 4 mostra o fluxo esquemático da conversão das radiações espectrais na ET com o uso de parâmetros obtidos de satélites em conjunto com os valores diários da ET_0 , quando da aplicação do modelo.

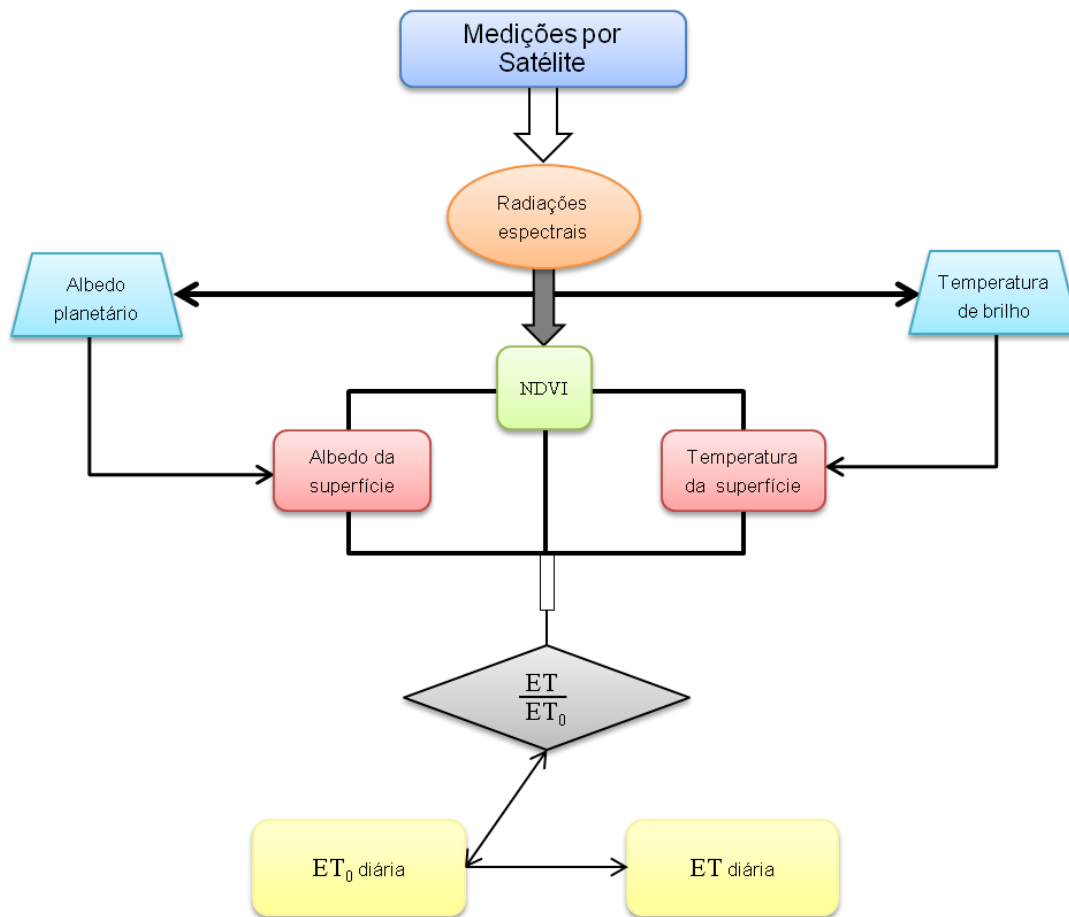


Figura 4. Fluxo esquemático para obtenção da evapotranspiração em larga escala com a aplicação do modelo Safer.

O Modis é um instrumento a bordo das plataformas Terra/Acqua com 36 bandas espectrais entre $0,405 \mu\text{m}$ e $14,385 \mu\text{m}$ e que dispõe de dados com diferentes resoluções espectrais (250 m, 500 m e 1.000 m). Os produtos usados neste documento foram dados no nível L1B, que contém radiâncias para essas bandas. Apenas quatro bandas foram usadas, duas na faixa do visível (bandas 1 e 2), com resolução espacial de 250 m, e as outras duas na faixa termal (bandas 31 e 32), com resolução espacial de 1.000 m. As radiações para cada banda (L_b), em $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, foram calculadas como:

$$L_b = a(DN - b) \quad (27)$$

onde a e b são constantes de calibração para o Modis, fornecidas no arquivo HDF.

Considerando-se as faixas no vermelho e no infravermelho do Modis, α_{p_b} foi calculado usando a Equação 4 com as bandas 1 e 2. Para os cálculos de α_0 , os valores de reflectância para essas bandas foram usados de acordo com a seguinte equação de regressão (VALIENTE et al., 1995):

$$\alpha_0 = a + b\alpha_{p_1} + c\alpha_{p_2} \quad (28)$$

onde α_{p_1} e α_{p_2} são os albedos planetários para as bandas 1 e 2 resultantes de medições do satélite Modis, e a , b , e c são coeficientes de regressão obtidos comparando-se essas medições com dados de campo nos anos de 2002 e 2004 (TEIXEIRA et al., 2008), portanto já incluindo os efeitos atmosféricos no caminho da radiação. Os valores encontrados para as condições semiáridas brasileiras foram, respectivamente, 0,08, 0,41 e 0,14.

Para a obtenção de T_0 , as bandas 31 e 32 do Modis foram usadas por meio da Equação 8, considerando-se a L_b dessas bandas para conversão em T_{sat} . Nesse caso, os valores de k_1 e k_2 foram calculados com as equações seguintes (OGURO et al., 2011):

$$k_1 = 2hc^2\lambda^{-5}10^{-6} \quad (29)$$

$$K_2 = \frac{hc}{s\lambda} \quad (30)$$

onde h é a constante de Planck ($6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$), c é a velocidade da luz ($2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$), λ é o comprimento de onda central para cada banda, em metros.

Uma equação de regressão simples pôde ser aplicada com razoável precisão em relação aos dados experimentais (TEIXEIRA et al., 2008):

$$T_0 = aT_{31} + bT_{32} \quad (31)$$

onde T_{31} e T_{32} são as temperaturas de brilho das bandas 31 e 32 e os coeficientes a e b foram igualmente 0,50 para as condições semiáridas brasileiras, também incluindo os efeitos da atmosfera no caminho percorrido pela radiação.

Considerando-se o modelo Safer aplicado a imagens Landsat 5 TM, como no caso do Sebal, as bandas de 1 a 5 e 7 foram usadas no cálculo de α_0 e a banda 6 foi considerada para a obtenção de T_0 . Equações de regressão também foram aplicadas para medições de α_0 com piranômetros e cálculos de α_p , enquanto a radiação térmica foi corrigida usando valores de campo e os obtidos por satélite (TEIXEIRA et al., 2009a; TEIXEIRA, 2010).

As imagens de NDVI, α_0 e T_0 são os únicos parâmetros de entrada para a modelagem dos valores da razão ET/ET_0 com a utilização do Safer. Os valores dessa razão foram, então, multiplicados pelas grades diárias de ET_0 para a estimativa dos valores da ET nessa escala de tempo em larga escala.

Ambos r_s e ET/ET_0 estão relacionados com as condições de umidade do solo, bem como com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto. Com base neste princípio, um segundo modelo foi aplicado para a obtenção da r_s objetivando efetuar uma classificação simplificada da vegetação.

Os modelos Safer e da r_s , em conjunto com a Equação 26 permitiram a quantificação dos componentes do balanço de energia e de água em larga escala envolvendo diferentes agroecossistemas na região semiárida do Brasil, incluindo vegetação natural e culturas irrigadas. Relações entre índices de vegetação com umidade do solo e taxas evapotranspiratórias têm sido reportadas previamente nessas condições (TEIXEIRA et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2009a, 2009b).

A equação seguinte foi aplicada para a obtenção da ET em larga escala (TEIXEIRA, 2012a):

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \text{NDVI}} \right) \right] \quad (32)$$

onde a e b são coeficientes de regressão, com valores de 1,90 e -0,008, respectivamente, para as condições semiáridas brasileiras.

Os valores de ET/ET_0 para o momento da passagem do satélite Landsat foram comparados com os diários em estudo prévio envolvendo espécies da Caatinga e pomar de mangas irrigado, sendo a inclinação da reta de regressão bem próxima de 1,00 (TEIXEIRA, 2010). Esses resultados nas condições semiáridas do Brasil suportam a consideração de similaridade entre os valores dessa razão, instantâneos e diários, em condições de ausência de nebulosidade (ALLEN et al., 2007).

Os resultados da ET obtidos pelo Safer (Figura 4) foram preliminarmente comparados com aqueles provenientes do Sebal no noroeste de São Paulo (HERNANDEZ et al., 2013), tomando-se como referência o manejo de água baseado no tradicional método da FAO (ALLEN et al., 1998). Observou-se a necessidade de ajuste apenas para o coeficiente da Equação 32, o qual foi adaptado para 1,00 para a aplicação do Safer na região do estudo, mostrando a facilidade de ajuste na equação, mesmo na ausência de medições da ET em campo.

Para a separação dos componentes do balanço de energia, incluindo a ET, de culturas irrigadas e vegetação natural, a equação seguinte foi aplicada considerando-se para r_s valores limites que representem condições de presença e de ausência de irrigação (TEIXEIRA, 2012b).

$$r_s = \exp \left[a \left(\frac{T_0}{\alpha_0} \right) (1 - NDVI) + b \right] \quad (33)$$

onde r_s é dada em $s\ m^{-1}$ e a e b , $-0,04\ s\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ e $2,72$, respectivamente, foram os coeficientes de regressão encontrados para as condições semiáridas do Brasil.

Para obtenção dos valores diários de R_n , a Equação 26 também foi aplicada. Em média, o coeficiente a_1 para os agroecossistemas nas condições semiáridas brasileiras foi 143. Em decorrência da dependência da radiação de ondas longas pelos valores de T_a , investigou-se se as variações de a_1 poderiam ser explicadas pelas variações diárias das condições térmicas (TEIXEIRA et al., 2008):

$$a_1 = bT_a - c \quad (34)$$

onde T_a é dado em $^\circ C$, b e c foram $7\ ^\circ C$ e $39,9$, respectivamente, para as condições semiáridas do Brasil.

Transformando-se ET em unidades de energia usando a relação $1\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1} = 0,408\ mm\ d^{-1}$ (ALLEN et al., 1998), λE para 24 horas foi quantificado e H foi obtido como resíduo na Equação 1, desprezando-se os pequenos valores de G na escala diária. Teixeira et al. (2008) demonstraram que esses valores para 24 horas são próximos de zero tanto em culturas irrigadas quanto em vegetação natural nas condições semiáridas brasileiras.

A Equação 12 também foi usada para a obtenção de RL_{\downarrow} , mas com valores diários de 0,94 e 0,11 para, respectivamente, os coeficientes de regressão a e b da Equação 13 (TEIXEIRA et al., 2008). Tendo grades de RS_{\downarrow} das estações agrometeorológicas, os valores em larga escala de RL_{\uparrow} puderam ser estimados como resíduo na Equação 2.

Comparação entre os modelos Sebal e Safer

Um grande desafio para modelos que usam imagens de satélites para a obtenção da ET tornarem-se aplicáveis é a instalação de estações agrometeorológicas para a união de dados climáticos e parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, seguida de testes em ecossistemas diversos. Embora mais aplicável que o Sebal, antes de analisarmos as aplicações do Safer em

larga escala na região semiárida brasileira foram feitas comparações entre os resultados da ET usando ambos os modelos e o manejo de água pelo método padronizado da FAO (ALLEN et al., 1998). Diferentes culturas e condições de cobertura do solo foram consideradas no noroeste de São Paulo. Essas comparações são importantes para dar mais confiabilidade ao Safer, considerando-se que este é um modelo recentemente elaborado (TEIXEIRA, 2010, 2012a).

A fazenda comercial Bonança, no noroeste de São Paulo, tem coordenadas centrais de 20°41'40"S e 50°59'02"W. Uma imagem Landsat 5 TM adquirida em 12 de julho de 2010 (80 dias após a última chuva) foi usada em conjunto com dados climáticos de uma estação agrometeorológica próxima à fazenda. As comparações entre os modelos foram feitas considerando-se 20 pivôs centrais, cobrindo uma área total irrigada de 2.110 ha com milho, feijão e cana-de-açúcar.

Para aplicação do Safer em São Paulo, o coeficiente da Equação 32 foi primeiramente ajustado para 1,0 considerando-se a similaridade entre os valores de coeficiente de cultura (K_c), provenientes das diretrizes da FAO, geralmente adotadas pelos produtores, e os resultados da razão ET/ET_0 modelada nas porções mais úmidas das áreas de cobertura dos pivôs para cada cultura específica.

Os resultados da ET da aplicação dos dois modelos são apresentados na Figura 5.

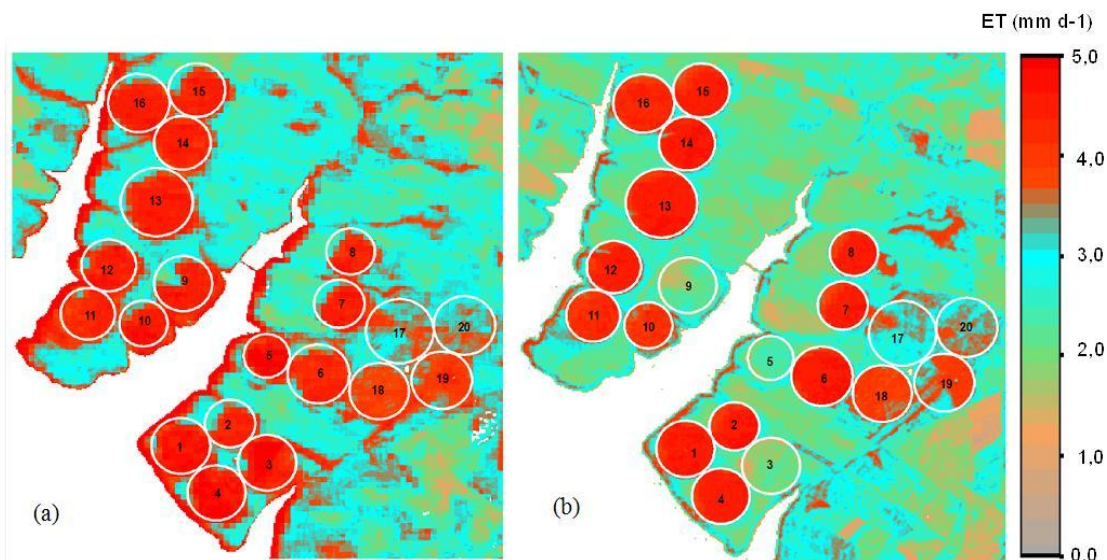


Figura 5. Evapotranspiração diária (ET) resultante da aplicação do Sebal (a) e do Safer (b), para uma imagem Landsat 5 TM adquirida em 12 de julho de 2010, em áreas de pivôs irrigadas na Fazenda Bonança, noroeste de São Paulo, Brasil.

Na Figura 5, os pivôs centrais de números 1-2 e 6-16 estão sobre a cultura do milho, o número 9 está sobre esta cultura em repouso; 3 e 5 estão sobre feijão; e 17-20, sobre a cultura da cana-de-açúcar. As culturas estão em estágios com diferentes dias após o plantio (DAP), com as áreas sobre os pivôs variando de 70 ha a 160 ha.

Pode-se ver claramente uma menor sensibilidade para o Sebal (Figura 5a) em relação ao Safer (Figura 5b), pelo grau de uniformidade dos valores da ET dentro das áreas bem irrigadas cobertas pelos pivôs. O desvio padrão (DP) médio para o primeiro método foi de 0,22 mm d⁻¹, enquanto, para o segundo, este foi de 0,16 mm d⁻¹, o que indica 38% mais variação para o modelo Sebal que quando o Safer foi aplicado. Como primeira reflexão, os resultados provenientes da aplicação do Sebal são menos realistas, considerando-se que, nas áreas completamente irrigadas pelos pivôs, a água é aplicada de maneira uniforme.

De fato, os baixos valores generalizados de DP, em torno de $0,20 \text{ mm d}^{-1}$ para ambos os modelos, indicam uniformidade razoável nas áreas irrigadas pelos pivôs, com valor mais alto acontecendo na área do pivô 9. Essa perda de uniformidade é notada principalmente na aplicação do Sebal, quando o DP médio foi de $0,70 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto, para o Safer, este foi de $0,30 \text{ mm d}^{-1}$. A razão para essa ausência de uniformidade, bem como a diferença entre os modelos, é o fato de que a cultura do milho estava em repouso com irrigação reduzida.

Comparando-se as taxas evapotranspiratórias provenientes das aplicações dos modelos Sebal e Safer com o manejo de irrigação com base nos coeficientes de cultura (K_c) da FAO em todas as áreas irrigadas no dia da passagem do Landsat, essas taxas foram 45% e 29% mais altas que a água aplicada, respectivamente. O erro quadrático médio (EQM) foi calculado tomando-se essa quantidade de água aplicada como referência. As variações de EQM, de acordo com DAP, para as culturas do feijão (pivôs 3 e 5 com 5 e 13 DAP, respectivamente) e do milho (pivôs 1-2 e 6-16, após 75 DAP) são apresentados na Figura 6.

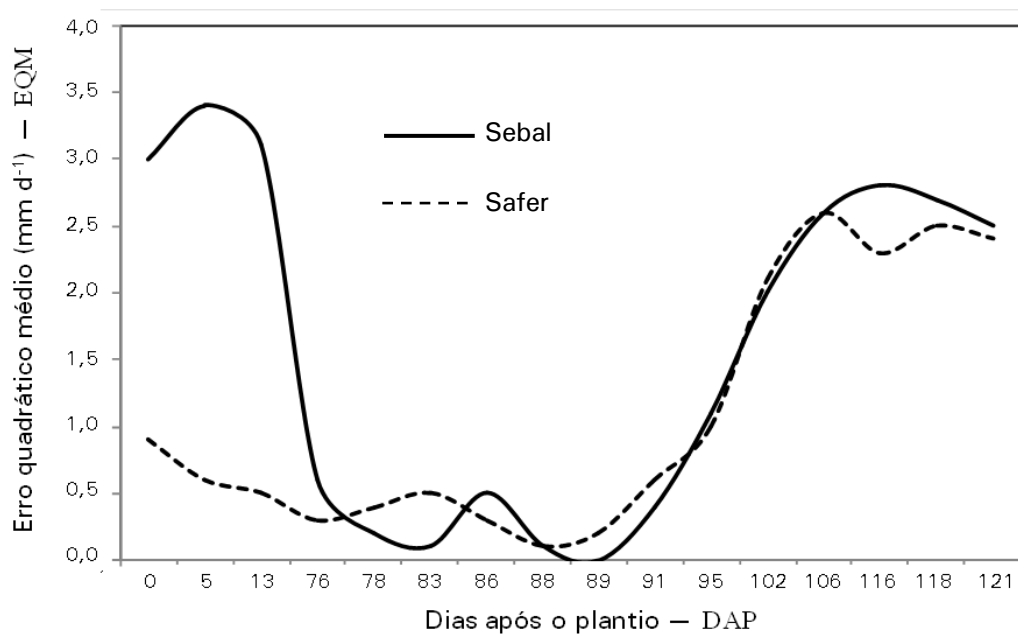


Figura 6. Relações entre os valores de erro quadrático médio (EQM) resultantes da aplicação dos métodos Sebal e Safer para obtenção da evapotranspiração, com a aplicação de água, com base no método tradicional da FAO, tomado como referência, e de acordo com os dias após o plantio (DAP), para as culturas do milho e feijão.

Em geral, os resultados da ET para ambos os modelos, Sebal e Safer, concordaram razoavelmente bem com a metodologia de aplicação de água pelo método tradicional da FAO durante o período de 75 DAP a 95 DAP, com valores de EQM em torno de $0,40 \text{ mm d}^{-1}$. Por um lado, após esse período, a quantidade de água aplicada difere muito dos resultados para ET considerando-se ambos os métodos por sensoriamento remoto, os quais coincidiram bem entre si, indicando possibilidade do uso de baixos valores de K_c pelo produtor. Por outro lado, os valores de EQM provenientes do Sebal nos estágios iniciais são muito maiores que os do modelo Safer.

Embora as áreas com cana-de-açúcar (pivôs 17-20) não tenham sido irrigadas no dia de aquisição da imagem Landsat 5 TM, as altas taxas evapotranspiratórias nos pivôs 18 e 19, considerando-se ambos os modelos, indicaram teores de umidade do solo suficientes na zona das raízes. Como as plantas estavam com grandes áreas foliares (DAP = 120) e considerando-se, ainda, a similaridade nos valores de EQM indicados na Figura 6, a boa concordância entre o Sebal e o Safer em situações de grande cobertura do solo fica reforçada.

As medições por satélites podem identificar precisamente os estágios das culturas, e os resultados da razão ET/ET_0 de medições por sensoriamento remoto indicaram que esses estágios devem ser considerados com maior precisão e objetividade pelo produtor, por exemplo, por meio de aplicação de relações entre o K_c e os graus-dias acumulados. De acordo com Teixeira (2009), a vantagem do uso dessas relações é a inclusão das condições térmicas na calibração dos valores de K_c .

Uma das razões das diferenças nos resultados entre o Sebal e o Safer em relação à aplicação de água pode ser decorrente do fato de que o primeiro modelo dá mais peso à temperatura da superfície, a qual é calculada por meio da banda termal, cuja resolução espacial é menor que aquela para a faixa do visível e infravermelho próximo, e o H é obtido iterativamente. Por um lado, nos estágios iniciais, as condições térmicas são mais diferenciadas, e a precisão na obtenção de G também é questionável para a estimativa de λE como resíduo na Equação 1 no momento da passagem do satélite. Por outro lado, para aplicação do Safer, λE é obtido anteriormente ao H e a razão ET/ET_0 é relacionada a α_0 , NDVI e T_0 , parâmetros obtidos por sensoriamento remoto que combinam as relações solo-água-vegetação-atmosfera.

Considerando-se a maior confiabilidade do modelo Safer e também a sua aplicabilidade em conjunto com estações agrometeorológicas, ele foi aplicado a imagens Modis e Landsat 5 TM na estimativa da ET na escala municipal nas condições semiáridas do Brasil. Dados adicionais de $RS\downarrow$, T_a e ET_0 permitiram a obtenção dos componentes do balanço de energia na escala do perímetro irrigado.

Obtenção dos componentes do balanço de energia no Semiárido brasileiro

Os valores mensais da ET foram analisados no Município de Petrolina (PE) usando imagens Modis, enquanto, para o Município de Juazeiro (BA), isso foi feito usando imagens Landsat 5 TM, considerando-se as escalas de tempo diária e anual. Para o distrito de irrigação Nilo Coelho, imagens Landsat foram usadas abordando os períodos mais secos ao longo dos anos, para quantificação dos efeitos da mudança de uso da terra nos componentes do balanço de energia, causados pela substituição da vegetação natural por culturas irrigadas na região semiárida brasileira. Os resultados e as análises são descritos nas seções seguintes.

Evapotranspiração na escala do município

Após os cálculos da ET para toda a área apresentada no lado direito da Figura 1, com utilização de imagens Modis e Landsat 5 TM, os municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) foram extraídos e os fluxos hídricos e de energia analisados, considerando-se diferentes escalas espaciais e temporais.

Evapotranspiração mensal no Município de Petrolina

Quinze imagens ET/ET_0 , com seis dias em 2010 e nove em 2011 foram usadas em conjunto com grades de valores mensais de ET_0 do ano de 2011, representando diferentes condições climáticas ao longo do ano na região semiárida brasileira. As taxas evapotranspiratórias diárias foram calculadas para a área total envolvida pelas estações agrometeorológicas, indicadas no lado direito da Figura 1. O Município de Petrolina, Estado de Pernambuco (PE), situado no Nordeste do Brasil, foi extraído para as análises dos fluxos hídricos. A Figura 7 apresenta a

distribuição espacial dos valores mensais da ET para 2011 após processos de interpolação e médias ao longo do ano.

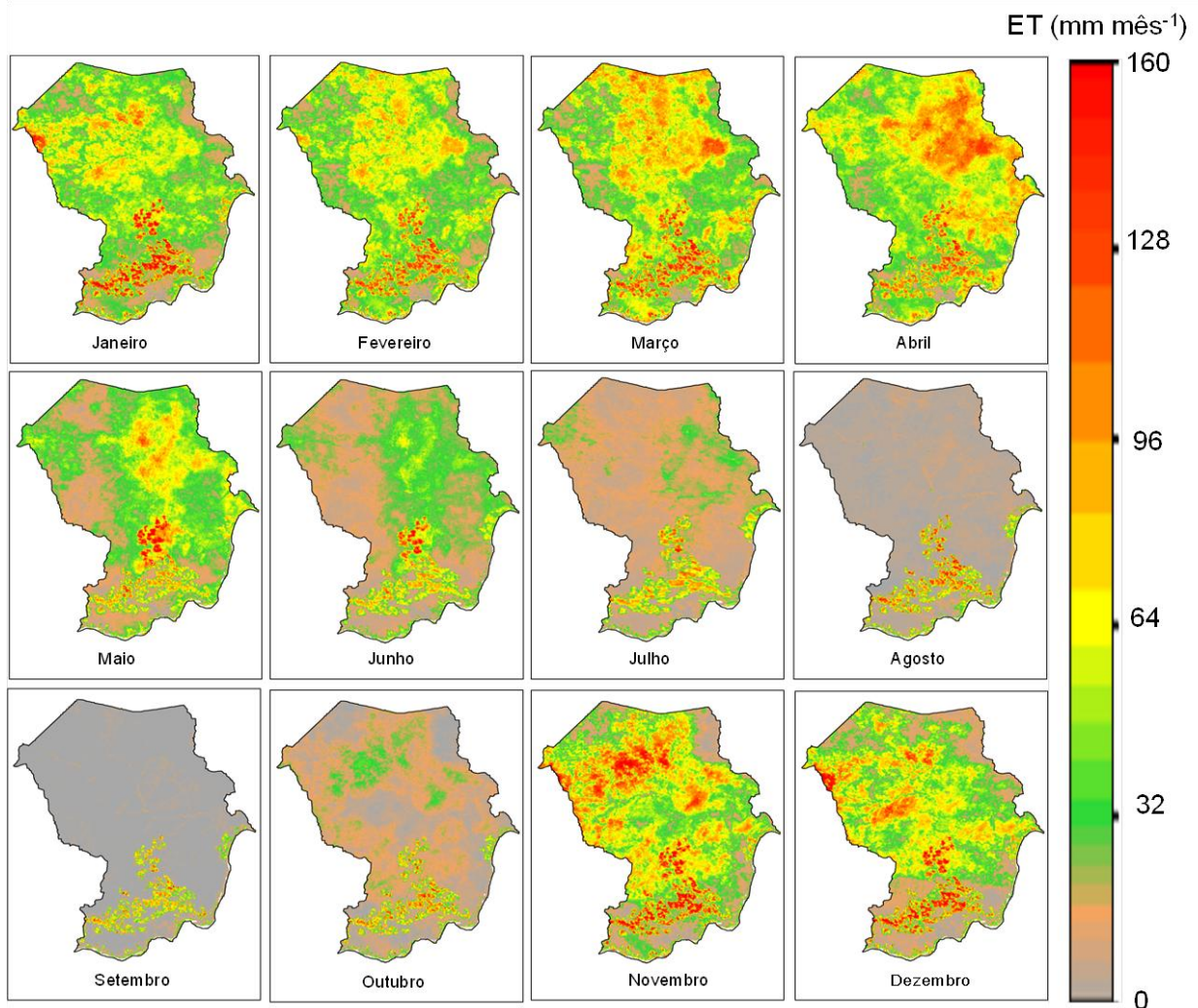


Figura 7. Distribuições espaciais dos valores mensais de evapotranspiração (ET) para o ano de 2011, obtidas mediante aplicação do Safer em imagens Modis, no Município de Petrolina, PE.

Considerando-se o Município de Petrolina como um todo, as variações espaciais e temporais da ET ao longo do ano são evidentes, principalmente quando se compara o período mais úmido, de fevereiro a abril, com o mais seco, entre julho e setembro. Durante o período chuvoso, os valores máximos de ET são verificados em abril, com média municipal de 61 mm mês^{-1} . Em novembro, acontece outro pico com um valor médio de 58 mm mês^{-1} . Fluxos hídricos intermediários ocorrem logo após a estação chuvosa, de maio a junho, em decorrência das precipitações antecedentes, de janeiro a abril, que favorecem condições de umidade do solo e deixam as espécies da Caatinga ainda verdes e úmidas.

Como uma consequência das mais altas frações da energia disponível usada como H na Caatinga, durante o período mais seco do ano, de julho a outubro, esta vegetação natural apresenta as menores taxas evapotranspiratórias, enquanto as áreas irrigadas apresentam as maiores. Os estômatos das espécies da Caatinga fecham-se nessas condições secas, limitando a transpiração e a fotossíntese, e, em geral, os intervalos de irrigação nas culturas agrícolas são curtos (irrigação diária), com suprimentos de água uniformes, reduzindo a transferência de calor para a atmosfera.

De acordo com a Figura 7, os efeitos das condições de umidade na magnitude das taxas da ET são fortes. Pixels com valores menores que $1,0 \text{ mm mês}^{-1}$ são observados durante o período sem chuvas e representam a vegetação natural seca. Os mais altos valores de DP, de 35 mm mês^{-1} , acontecem em novembro, como consequência do efeito conjunto do início das chuvas e da heterogeneidade causada pelas diferenças de estágios das culturas, enquanto o mês mais seco, setembro, apresenta o menor DP, de 17 mm mês^{-1} .

Considerando-se todo o ano, a média das taxas da ET para a mistura de agroecossistemas torna-se $438 \pm 235 \text{ mm ano}^{-1}$. Estudos prévios com sensoriamento remoto nas condições semiáridas do Nordeste brasileiro reportaram as mais elevadas taxas evapotranspiratórias em videiras para mesa e mangueira, com os valores da ET em vegetação natural próximos aos totais anuais de precipitação (TEIXEIRA et al., 2009b).

Evapotranspiração diária e anual no Município de Juazeiro

Ainda considerando-se a escala municipal, três imagens Landsat 5 TM para os dias 20 de janeiro de 2007, 10 de junho de 2011 e 17 de novembro de 2009 foram usadas para o cômputo das taxas diárias de ET, também para a área total envolvida pelas estações agrometeorológicas apresentadas no lado direito da Figura 1. Essas datas representam diferentes condições termais e hidrológicas ao longo do ano no Semiárido brasileiro. A imagem da ET/ET_0 média dos períodos representativos de diferentes condições hidrológicas foi multiplicada pela grade de ET_0 para o ano de 2010, e o Município de Juazeiro (BA) foi extraído para quantificação e análises da ET anual e de sua distribuição de frequência (Figura 8).

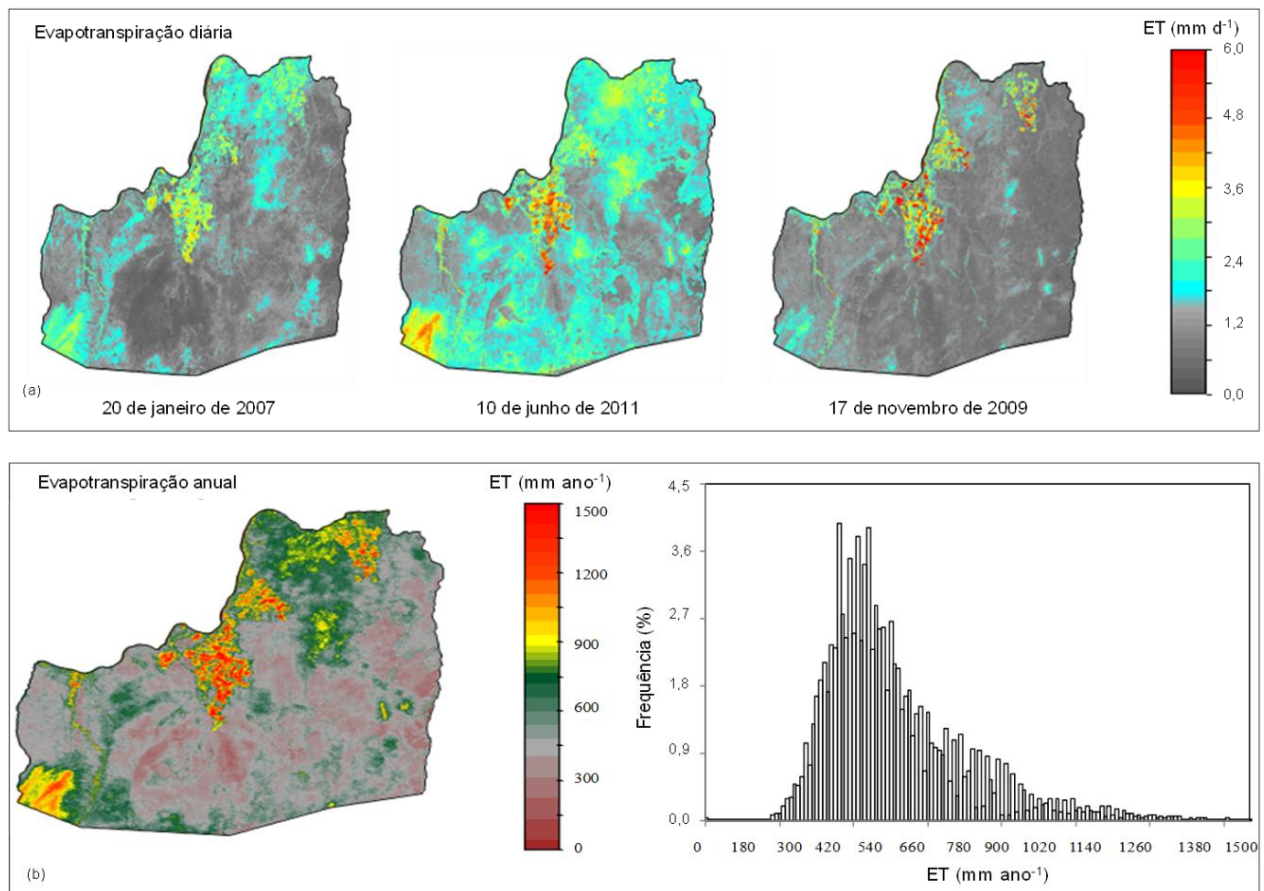


Figura 8. Distribuição espacial da evapotranspiração (ET) pela aplicação do Safer em imagens Landsat 5 TM no Município de Juazeiro, Estado da Bahia (BA), Nordeste do Brasil: (a) para dias representativos de diferentes condições climáticas ao longo do ano e (b) para o ano de 2010 conjuntamente com os histogramas de distribuição de frequência.

De acordo com a Figura 8a, pode-se ver a concentração de culturas irrigadas pelos mais altos valores diários da ET na porção superior do Município de Juazeiro, na margem direita do Rio São Francisco.

Por um lado, no início do período chuvoso (representado pela imagem de 20 de janeiro de 2007), os produtores geralmente suspendem a irrigação e algumas parcelas de uvas ficam em repouso, promovendo baixos valores diários da ET, menores que $3,5 \text{ mm d}^{-1}$, nas áreas irrigadas. Por outro lado, algumas espécies da Caatinga são beneficiadas pelas primeiras chuvas do ano e produzem elevada biomassa. Nessas circunstâncias, considerando-se o município como um todo, a média diária da ET foi de $1,3 \text{ mm d}^{-1}$.

As taxas evapotranspiratórias aumentam rapidamente após o período chuvoso (condição representada pela imagem de 10 de junho de 2011), para ambas as áreas, irrigadas ou com vegetação natural. Nas parcelas com culturas agrícolas, isso acontece porque os produtores reativam os sistemas de irrigação com contínuo aumento das condições térmicas e início dos ciclos produtivos de vários parreirais. Considerando-se as espécies da Caatinga, as chuvas antecedentes promovem suficiente umidade na zona das raízes, deixando esse ecossistema com consumo hídrico ainda ativo. Nessas condições, as taxas diárias da ET no nível municipal são em torno de $1,9 \text{ mm d}^{-1}$.

Durante o período mais seco do ano (representado pela imagem de 17 de novembro de 2009), a Caatinga converte largas frações da energia disponível em H, quando ocorrem as menores taxas diárias de ET nas espécies naturais. As culturas comerciais apresentam as maiores taxas evapotranspiratórias do ano, acima de $4,5 \text{ mm d}^{-1}$ nas parcelas bem irrigadas, principalmente com pomares de manga e parreirais. Nessas circunstâncias, na escala municipal, as taxas da ET são as menores do ano, em torno de $1,2 \text{ mm d}^{-1}$, em decorrência da maior área coberta com vegetação natural seca.

Pela Figura 8b, as taxas anuais da ET que representam as espécies da Caatinga estão concentradas entre 300 mm ano^{-1} e 600 mm ano^{-1} , enquanto para culturas irrigadas estas se situam na faixa entre 900 mm ano^{-1} e $1.500 \text{ mm ano}^{-1}$. Pixels com as maiores frequências apresentam valores em torno de 500 mm ano^{-1} , taxa essa considerada baixa e consequência da predominância da vegetação natural distante do Rio São Francisco.

A média anual da ET para todo o Município de Juazeiro foi de 40 mm ano^{-1} , porém com grande valor de DP, de 200 mm ano^{-1} , o que evidencia forte heterogeneidade hidrológica como consequência da composição dos agroecossistemas de vegetação natural e culturas irrigadas.

Balanco de energia na escala do distrito de irrigação

Para a escala de perímetro irrigado, foram usadas dez imagens Landsat 5 TM para o período mais seco do ano, de 1992 a 2011, na quantificação da evolução da partição diária da energia disponível (R_n), em λE e H, no perímetro de irrigação Nilo Coelho. Uma estação agrometeorológica convencional em Bebedouro, localizada no Município de Petrolina (PE), juntamente com uma automática no mesmo local (Figura 1), foi adicionalmente usada para aplicação de equações de regressão na estimativa dos parâmetros climáticos interpolados antes de 2003.

Após interpolações de $RS\downarrow$, T_a e ET_0 em conjunto com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto α_0 , T_0 e NDVI para toda a área representada no lado direito da Figura 1, o perímetro irrigado Nilo Coelho foi extraído para as análises das tendências dos componentes do balanço de

energia ao longo dos anos, na medida em que as espécies da Caatinga foram sendo substituídas por culturas irrigadas.

As variações espaciais e temporais dos valores diários dos componentes do balanço de energia resultantes do processamento de imagens Landsat 5 TM para cada dia/ano de 1992 a 2011 em Nilo Coelho são apresentadas na Figura 9.

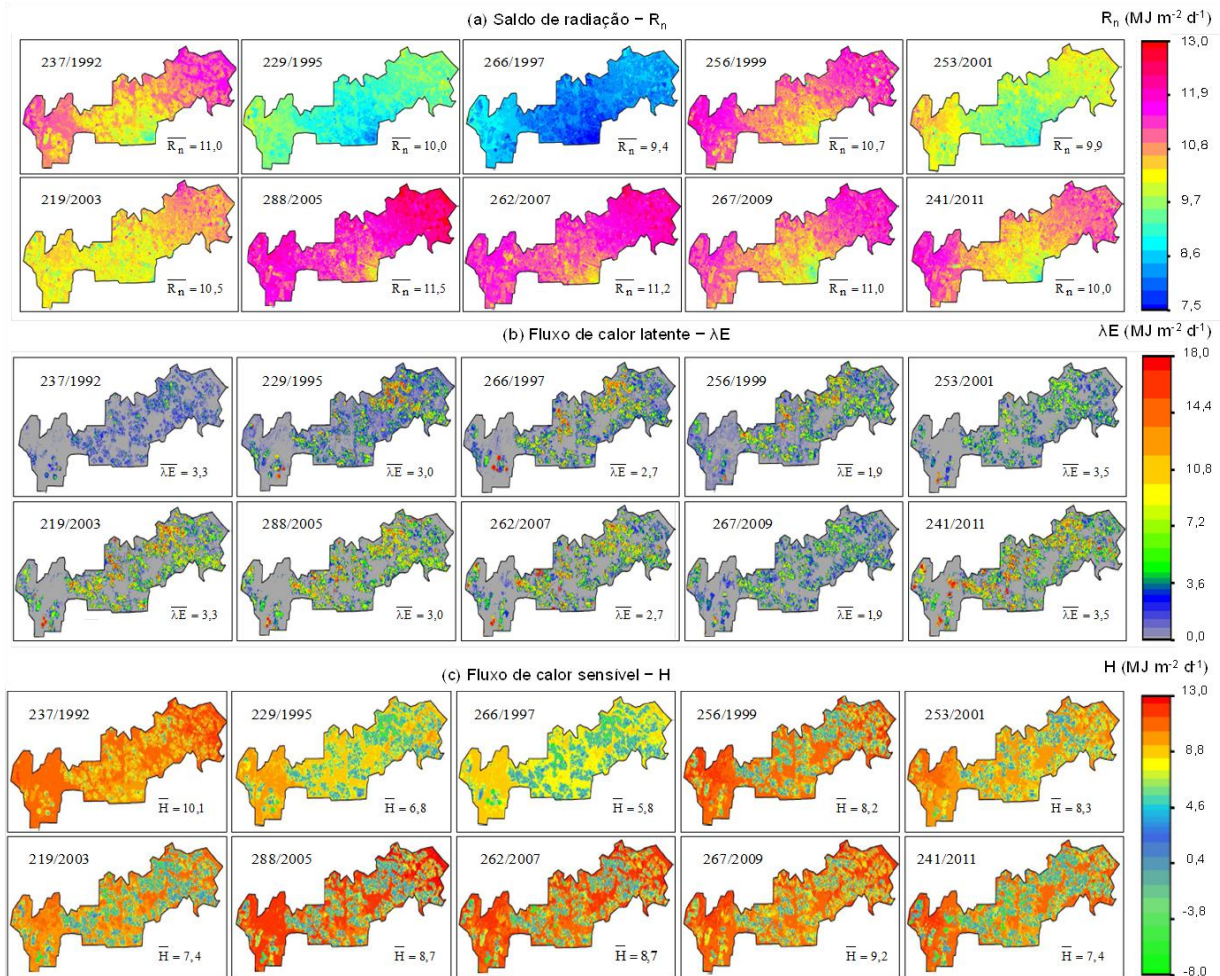


Figura 9. Variações temporais e espaciais dos componentes diários do balanço de energia pela aplicação conjunta do modelo Safer e da equação de Slob em imagens Landsat 5 TM para o período mais seco do ano, de 1992 a 2011, no perímetro de irrigação Nilo Coelho: (a) saldo de radiação (R_n); (b) fluxo de calor latente (λE); e (c) fluxo de calor sensível (H). As barras representam médias dos pixels.

A Figura 9a apresenta a variação espacial da energia diária disponível, representada pelo saldo de radiação (R_n), desprezando-se os pequenos valores de G nessa escala de tempo. A fração de RS_{\downarrow} transformada em R_n esteve entre 42% e 50%, com média de 46%, e com confirmação do valor dessa razão em torno de 50% pelos resultados de medições de campo nas condições semiáridas brasileiras (TEIXEIRA et al., 2008). Essas concordâncias entre medições por sensoriamento remoto com aquelas feitas em campo fortalecem a modelagem dos componentes do balanço de energia diário usando imagens Landsat 5 TM e estações agrometeorológicas em larga escala.

Em geral, não há distinção clara entre os valores diários dos pixels de R_n das culturas irrigadas e aqueles para vegetação natural ao longo dos anos, por exemplo, comparando-se um dia do ano similar representado pelas imagens de 1992 e 2011, quando se tem a maior diferença em termos de mudança de uso da terra. Também não há grandes diferenças espaciais, com DP variando de $0,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $0,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Observa-se que a mais forte dependência de R_n é

com RS_{\downarrow} , com o valor médio dos pixels de R_n mais elevado ocorrendo em 2005 (Figura 9a) e correspondendo ao mais alto nível de RS_{\downarrow} (média de $25,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) entre os dez dias analisados.

Claramente pode-se distinguir as áreas irrigadas das espécies da Caatinga pelos valores mais elevados de λE e mais baixos de H sob condições de irrigação (Figuras 9b e 9c). Os valores de H são até algumas vezes negativos nas áreas com culturas agrícolas, significando advecção de calor da vegetação natural mais quente e seca nas vizinhanças das parcelas irrigadas. Esse transporte horizontal de energia acontece mais nos sistemas de irrigação por microaspersão que naqueles por gotejamento (TEIXEIRA, 2009).

Em relação aos valores diários dos pixels para λE (Figura 9b), os incrementos ao longo dos anos são evidentes. Por um lado, considerando-se a área total do perímetro de Nilo Coelho, os valores médios aumentaram 390% de 1992 a 2011, o que significa que a substituição das espécies da Caatinga pelas culturas irrigadas incrementou em quase quatro vezes a transferência de vapor d'água para a baixa atmosfera nos períodos fora da estação chuvosa. Por outro lado, declínios nos valores dos pixels para H ao longo dos anos também são claros, com um valor médio em 1992 representando 136% daquele para 2011 (Figura 9c). Os consumos hídricos extras pelas culturas irrigadas aumentam as taxas evapotranspiratórias, reduzindo a temperatura do ar nas vizinhanças das superfícies vegetadas. Essa redução em conjunto com aumentos em r_a contribui para a queda nos valores dos pixels de H em condições de irrigação.

De 1992 a 1997, quando as áreas irrigadas começaram a crescer no perímetro de irrigação de Nilo Coelho, forte advecção de calor da vegetação natural seca para as áreas com irrigação foi observada pelos valores negativos de H , fazendo com que λE fosse maior que R_n nas parcelas de culturas bem supridas de água. As variações espaciais de ambos os fluxos de energia são largas, com valores de DP em torno de $3,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Apenas no começo do projeto de irrigação, em 1992, pode-se ver uma pequena variação espacial para esses fluxos, com valores de DP menores que $2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para ambos λE e H (Figuras 9b e 9c).

Separando-se a vegetação natural da área total do perímetro de Nilo Coelho, pode-se observar que a partição da energia é mais estável nas condições de ausência de chuvas, com taxas da ET muito pequenas para espécies da Caatinga, apresentando valores de $\lambda E/R_n$ e H/R_n em torno de 0,06 e 0,93. A principal característica da troca de energia para essas espécies durante o período mais seco do ano é a conversão de largas frações da energia disponível em H .

Considerações finais

Considerando-se os dois modelos para a obtenção da evapotranspiração analisados neste documento, a vantagem do Safer em relação ao Sebal é a ausência da necessidade de identificação das condições hidrológicas extremas e da necessidade de conhecimentos específicos da física da radiação. Para períodos com chuvas, a consideração de desprezar o fluxo de calor latente em pixels quentes no Sebal não é realista, em decorrência da ausência de áreas com valores nulos de evapotranspiração. Como vantagem adicional, o Safer apresenta, ainda, a possibilidade do uso de dados climáticos tanto de estações agrometeorológicas automáticas quanto convencionais, tornando possível uma avaliação histórica dos componentes do balanço de energia.

Quando comparados o Sebal e o Safer com a metodologia tradicional da FAO para quantificação dos requerimentos hídricos pelas culturas agrícolas, concluiu-se que, em condições de cobertura parcial do solo, o segundo modelo apresenta-se mais consistente com os estágios das culturas. Após a maior confiabilidade do modelo Safer, fazendo uso conjunto de parâmetros obtidos por

meio de imagens dos satélites Modis e Landsat 5 TM e dados climáticos, a quantificação e análise dos componentes do balanço de energia foi possível em uma mistura de agroecossistemas em diferentes escalas temporais e espaciais nas condições semiáridas brasileiras.

Observou-se que, no Semiárido do Brasil, as taxas evapotranspiratórias mais elevadas ocorrem em novembro para as culturas irrigadas e em abril para a vegetação natural. O acesso à quantificação dos componentes do balanço de energia em condições fora da estação chuvosa no perímetro de irrigação Nilo Coelho proporcionou melhor entendimento da dinâmica dos fluxos de energia ao longo dos anos na escala do perímetro irrigado. Essas informações preliminares são importantes para o dimensionamento dos impactos da mudança de uso da terra nos fluxos de energia e de água em larga escala.

Com o uso das ferramentas apresentadas e discutidas neste documento, pode-se concluir que, na região semiárida do Brasil, o saldo de radiação é mais fortemente dependente da radiação solar global que das condições hídricas, qualquer que seja o tipo de vegetação.

As frações médias do saldo de radiação usadas como fluxo de calor latente na área total de Nilo Coelho aumentou de 8% para 32% de 1992 a 2011, enquanto, nas áreas com irrigação, essas frações foram de 50% para 80%, revelando que à medida que a área irrigada cresce, mais energia disponível é usada no processo de evapotranspiração.

Para o modelo Safer tornar-se aplicável em outros ecossistemas, pode haver necessidade de se fazer ajustes nos coeficientes da equação que relaciona a fração da evapotranspiração atual à de referência, com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto. Após essas calibrações e com estimativas adicionais do saldo de radiação em conjunto com redes de estações agrometeorológicas, as trocas de energia em diferentes agroecossistemas em larga escala podem ser bem quantificadas.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W. G. M.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE**, v. 133, p. 395-406, 2007.
- ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; GAO, F.; HAIN, C.; PRUEGER, J. H.; EVETT, E.; COLAIZZI, P.; HOWELL, T.; CHÁVEZ, J. L. Mapping daily evapotranspiration at Landsat spatial scales during BEAREX'08 field campaign. **Advances in Water Resources**, v. 50, p. 162-177, 2012.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; ROERINK, G. J.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

- BASTIAANSEN, W. G. M.; BRITO, R. A. L.; BOS, M. G.; SOUZA, R. A.; CAVALCANTI, E. B.; BAKKER, M. M. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: Benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, p. 53–79, 2001.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; SOPPE, R. W. O.; ALLEN, R. G.; THORESON, B. P.; TEIXEIRA, A. H. de C. Thermal infrared technology for local and regional scale irrigation analysis in horticultural systems. **Acta Horticulturae**, v. 792, p. 33–46, 2008.
- BRUIN DE, H. A. R.; STRICKER, J. N. M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. **Hydrological Sciences**, v. 45, p. 391–406, 2000.
- BUSINGER, J. A.; WYNGAARD, J. C.; IZUMI, Y.; BRADLEY, E. F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. **Journal of Atmospheric Science**, v. 28, p. 189–191, 1971.
- CLEUGH, H. A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S. W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 285–304, 2007.
- HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de C.; NEALE, C. M. U.; TAHVAEIN, S. Determining actual evapotranspiration and crop coefficient in large scale using weather station and remote sensing in the Northwest of the State of São Paulo, Brazil. **Acta Horticulturae**, in press, 2013.
- MAJUMDAR, T. J.; BRATTACHARYYA, R.; CHATTEJEE, S. On the utilization of ENVISAT AATSR data for geological/hydrological applications. **Acta Astronautica**, v. 60, p. 899-905, 2007.
- MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; De JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 453–469, 2011.
- OGURO, Y.; ITO, S.; TSUCHIYA, K. Comparisons of Brightness Temperatures of Landsat-7/ETM+ and Terra/MODIS around Hotien Oasis in the Taklimakan Desert. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, p. 1–11, 2011.
- PÔÇAS, I.; CUNHA, M.; PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Using remote sensing energy balance and evapotranspiration to characterize montane landscape vegetation with focus on grass and pasture lands. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 159–172, 2013.
- ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 25, p. 147–157, 2000.
- SCHNEIDER, K.; MAUSER, W. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 2027–2041, 1996.
- SMITH, R. G. C.; BARRS, H. D.; MEYER, W. S. Evaporation from irrigated wheat estimated using radiative surface temperature: an operational approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 48, p. 331–344, 1989.
- SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, p. 85–99, 2002.

TANG, Q.; ROSEMBERG, E. A.; LETENMAIER, D. P. Use of satellite data to assess the impacts of irrigation withdrawals on Upper Klamath Lake, Oregon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 617–627, 2009.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110–127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C. **Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region**. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2009. 226 p.

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 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 large scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 477–490, 2009b.

Teixeira, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287–1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Org.). **Remote Sensing and Hydrology**, v. 352, p. 154–157, 2012a.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determination of surface resistance to evapotranspiration by remote sensing parameters in the semi-arid region of Brazil for land-use change analyses. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Org.). **Remote Sensing and Hydrology**, v. 352, p. 167–170, 2012b.

TROUFLEAU, D.; Lhomme, J.-P.; Monteny, B.; Vidal, A. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse sahelian vegetation: is the k_B^{-1} a relevant parameter? **Journal of Hydrology**, v. 189, p. 815–838, 1997.

VALIENTE, J. A.; Nunez, M.; Lopez-Baeza, E.; Moreno, J. F. Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 1147–1166, 1995.



Monitoramento por Satélite

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

