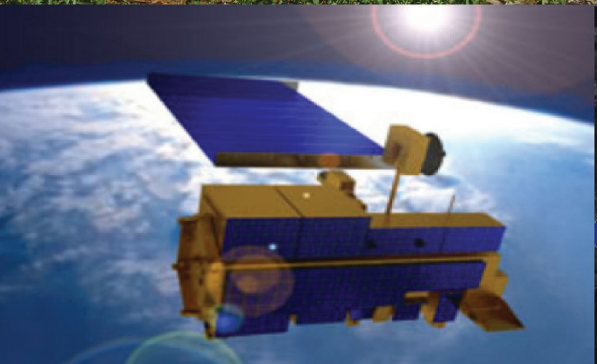


Estimativa de Evapotranspiração Real por Sensoriamento Remoto: procedimento e aplicação em pivô central



ISSN 1676-918X
ISSN online 2176-509X
Fevereiro, 2013

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 312

Estimativa de Evapotranspiração Real por Sensoriamento Remoto: procedimento e aplicação em pivô central

*Morris Scherer-Warren
Lineu Neiva Rodrigues*

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2013

Exemplar desta publicação disponível gratuitamente no link:
http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/versaomodelo/html/2013/bolpdp/bold_312.shtml

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970 Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
Fax: (61) 3388-9879
<http://www.cpac.embrapa.br>
sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Claudio Takao Karia*
Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*
Secretárias: *Maria Edilva Nogueira*
Alessandra S. Gelape Faleiro

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbues*

Equipe de revisão: *Francisca Eljani do Nascimento*

Jussara Flores de Oliveira Arbues

Normalização bibliográfica: *Shirley da Luz Soares Araújo*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Fotos da capa: *Lineu Neiva Rodrigues / Morris Scherer-Warren*

Impressão e acabamento: *Alexandre Moreira Veloso*

1ª edição

1ª impressão (2013): tiragem 100 exemplares

Edição online (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 Cerrados

S696e Scherer-Warren, Morris

Estimativa de evapotranspiração real por sensoriamento remoto : procedimento e aplicação em pivô central / Morris Scherer-Warren, Lineu Neiva Rodrigues. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2013.

35 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X ; 312).

1. Irrigação. 2. Evapotranspiração. 3. Irrigação – pivô central.
I. Rodrigues, Lineu Neiva. II. Título. III. Série.

631.587 - CDD-21

© Embrapa 2013

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	10
Área de trabalho	10
Materiais	12
Imagens de satélite	12
Dados meteorológicos	12
Softwares utilizados	13
Metodologia	13
Melhoria da resolução espacial da banda termal do Modis	13
Estimativa da $ET_{ref}F$ em uma imagem de referência usando a equação de balanço de energia	16
Estimativa da $ET_{ref}F$ usando regressão linear	18
Extrapolação temporal	19
Resultados e Discussão.....	21
Desagregação da temperatura do Modis.....	21
Estimativa da $ET_{ref}F$ por regressão linear.....	24
Extrapolação temporal	28
Conclusões.....	30
Referências	32

Estimativa de Evapotranspiração Real por Sensoriamento Remoto: procedimento e aplicação em pivô central

Morris Scherer-Warren¹

Lineu Neiva Rodrigues²

Resumo

Para o adequado manejo de recursos hídricos em pivôs de irrigação, faz-se necessário compreender a dinâmica temporal da evapotranspiração. O sensoriamento remoto, por meio da aplicação da equação de balanço de energia, representa uma forma prática e barata de monitorar a evapotranspiração real em superfície contínua. Mas a disponibilidade de sensores orbitais necessários para o cálculo da evapotranspiração é limitada em relação à resolução espacial ou à frequência temporal de imageamento, sendo atualmente limitada a sensores de baixa resolução espacial e alta resolução temporal (Modis e AVHRR). Neste trabalho, é desenvolvido um procedimento metodológico para a construção de séries temporais de evapotranspiração a partir de estimativas remotas do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – Modis. Por meio do desenvolvimento e aplicação de técnicas de processamento de imagens, foi possível obter estimativas com média resolução espacial (250 m e 500 m) e alta frequência temporal (> 7 dias), permitindo monitorar a evolução temporal da evapotranspiração real em pivôs de irrigação. Destaca-se ainda que o procedimento metodológico proposto foi desenvolvido considerando a eficiência operacional e a restrição da disponibilidade de dados coletados em campo para a calibração-validação do modelo que calcula a evapotranspiração.

Termos para indexação: satélite, coeficiente de cultura, irrigação.

¹ Geógrafo, D.Sc. em Recursos Hídricos, Agência Nacional de Águas (ANA)
Setor Policial, área 5, Quadra 3, Blocos "B", "L", "M" e "T". 70610-200 - Brasília-DF,
morris@ana.gov.br

² Engenheiro-agrícola, pós-doutor em Engenharia de Irrigação e Manejo de Água, pesquisador da
Embrapa Cerrados, lineu.rodrigues@embrapa.br

Estimating Actual Evapotranspiration with Remote Sensing: procedure an application in central pivot

Abstract

For the proper water management in central pivots it is necessary to understand the temporal dynamics of evapotranspiration. Remote sensing, using the energy balance equation, represents a practical and inexpensive way to monitor actual evapotranspiration continuously in space. The current polar satellite constellation necessary for the calculation of evapotranspiration has limitations in relation to the spatial resolution or the frequency of image acquisition, been limit to sensors with low spatial resolution and high temporal resolution (MODIS and AVHRR). In the present bulletin, a methodological procedure is developed for the construction of evapotranspiration time series using remote sensing acquired data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS sensor. Applying digital image processing techniques, it was possible to retrieve evapotranspiration estimations with median spatial resolutions (250 m and 500 m) and high temporal frequency (> 7 days), allowing to monitor the temporal evolution of the actual evapotranspiration in central pivots. The proposed methodological procedure was developed considering the operational efficiency and the non-availability of in-situ collected data for calibration-validation of the model used to calculate evapotranspiration.

Index terms: satellite, crop coefficient, irrigation.

Introdução

A sustentabilidade da agricultura irrigada depende de alguns fatores, entre eles, destaca-se o manejo da irrigação, que depende da compreensão da dinâmica temporal e da distribuição espacial da evapotranspiração. A evapotranspiração abrange todos os processos no qual a água líquida é transformada em vapor de água na superfície terrestre, incluindo a evaporação da água no dossel das plantas, corpos d'água e solos e a transpiração das plantas (DINGMAN, 2002).

A equação de Penman-Monteith é frequentemente utilizada para calcular a evapotranspiração de superfícies vegetadas e não vegetadas, sendo obtida pela combinação dos métodos de balanço de energia e transferência de massa (CAMPBELL; NORMAN, 1998). Para criar uma superfície de referência para a utilização da equação de Penman-Monteith, Allen et al. (1998) desenvolveram a equação FAO Penman-Monteith. Essa equação é válida para uma superfície hipotética de grama, com altura fixa de 0,12 m, resistência superficial de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Essa resistência superficial equivale à situação potencial na qual não há limitação de água para a grama.

A equação FAO Penman-Monteith, quando aplicada em uma superfície com essas características (ex.: estação meteorológica), resulta na evapotranspiração de referência – ET_{ref} . Mas existem diferenças entre os valores de evapotranspiração da grama e de outras coberturas (ex.: cultura agrícola) sob as mesmas condições potenciais (sem limitação de água, ausência de doenças, pragas e salinização). Essas diferenças estão relacionadas com a altura da planta, albedo, resistência do dossel e evaporação da água no solo (ALLEN et al., 1998).

As diferentes características entre a grama de referência e a cultura de interesse podem ser agrupadas em um único coeficiente, denominado de coeficiente de cultura (K_c). O K_c , por sua vez, pode ser multiplicado pela evapotranspiração de referência para se obter a evapotranspiração potencial (mm dia^{-1}) da cultura de interesse ($ET_c = ET_{ref} K_c$).

Mas, sob condições não ideais (ex.: limitação de água), a evapotranspiração real é menor que a evapotranspiração potencial. Nesse caso, a evapotranspiração real (mm dia^{-1}) pode ser obtida considerando um coeficiente de estresse hídrico – K_s ($ET_{\text{real}} = ET_{\text{ref}} K_c K_s$). O K_s varia entre os valores de “1” e “0”, representando a condição de solo saturado (sem estresse hídrico) e o ponto de murcha (maior estresse hídrico), ou seja, o teor de água no qual a planta não consegue extrair mais água do solo.

A limitação da utilização da proposta da FAO-56 (ALLEN et al., 1998) em grandes áreas é em razão da necessidade de se conhecer dados acerca da cobertura vegetal (ex.: coeficiente da cultura ou resistência aerodinâmica) e do teor de água no solo (ex.: coeficiente de estresse hídrico ou resistência superficial), já que a evapotranspiração real sofre diminuição em relação à situação potencial em função da disponibilidade hídrica no solo.

Nos últimos anos, dados obtidos por sensoriamento remoto têm sido utilizados para o monitoramento da evapotranspiração real em larga escala (NORMAN et al., 1995; BASTIAANSSEN et al., 1998; SU, 2002; ALLEN et al., 2007; TEIXEIRA, 2010). A vantagem de utilizar o sensoriamento remoto para obter a evapotranspiração, em detrimento de outras perspectivas – como a proposta da FAO-56 (ALLEN et al., 1998) –, é que sua estimativa pode ser obtida exclusivamente por meio da equação de balanço de energia, sem necessidade de definir o tipo de cultura agrícola e o teor de água no solo.

No entanto, para o manejo da irrigação, é desejável o uso de estimativas de evapotranspiração com alta frequência temporal. A alta frequência temporal é necessária para se capturar a dinâmica da evapotranspiração ao longo do tempo, já que essa sofre alteração em função da quantidade de água precipitada ou aplicada por irrigação sobre o solo.

Na atual geração de satélites, entretanto, as opções de sensores termais necessários para o cálculo da evapotranspiração real são restritas em relação à frequência de imageamento e à resolução espacial (KALMAN

et al., 2008), representando limitações em aplicações de escala local, tais como o manejo agrícola. As opções atuais são de sensores termais de média resolução espacial e baixa resolução temporal (ETM, Aster) ou sensores termais de baixa resolução espacial e alta resolução temporal (Modis, AVHRR).

Os sensores de média resolução espacial apresentam limitações em função da intermitência de eventos de precipitação e irrigação no período de aquisição de duas imagens termais de média resolução espacial (≥ 16 dias) no qual o padrão espaço-temporal da precipitação/ irrigação altera a evapotranspiração em intervalo bastante inferior a 16 dias (JOHRAR et al., 2002). Já nos sensores de baixa resolução espacial, a obtenção da evapotranspiração em baixa resolução espacial ocasiona erro, pois a agregação da evapotranspiração em diferentes escalas espaciais não é linear (SU et al., 1999; HONG, 2009).

A evapotranspiração obtida por satélite é uma estimativa instantânea do horário exato do imageamento, não podendo ser aplicada diretamente para estimativas do balanço hídrico. Dessa forma, as estimativas instantâneas de evapotranspiração precisam ser extrapoladas temporalmente (horas, dias, semanas, etc); sendo necessário associar a estimativa de satélite com alguma medida realizada de forma contínua sobre a superfície terrestre, como as medidas obtidas em uma estação meteorológica, ou em experimentos agrometeorológicos (CHAVÉZ et al., 2008).

Para a realidade brasileira, os dados monitorados continuamente disponíveis para a extrapolação temporal das estimativas de evapotranspiração são aqueles encontrados em estações meteorológicas, incluindo a temperatura do ar, a velocidade do vento, a umidade relativa do ar e a radiação solar global. Allen et al. (2007) propõem a utilização da fração da evapotranspiração de referência (ET_{ref}) para a extrapolação temporal da evapotranspiração, obtida pela razão entre a evapotranspiração real estimada em cada pixel da imagem e a medida em uma estação meteorológica por meio da equação FAO Penman-Monteith.

Para estimar a ET_{ref} , é necessário desenvolver a equação de balanço de energia para cada imagem, sendo, portanto, complicado, do ponto de vista operacional, quando o número de imagens processadas é elevado, como na construção de uma série temporal de evapotranspiração.

Nota-se assim a necessidade de desenvolvimento de procedimento que possibilite a estimativa da evapotranspiração em áreas irrigadas por pivô central. Para poder ser efetivamente utilizado no manejo da irrigação, é desejável que o procedimento desenvolvido tenha as seguintes características: (a) 500 m de resolução espacial; (b) alta frequência temporal; e (c) eficiente do ponto de vista do processamento.

O objetivo do presente trabalho foi apresentar e aplicar um procedimento para construção de séries temporais de evapotranspiração real a partir do sensor Modis, visando sua utilização no monitoramento da evapotranspiração real em pivôs de irrigação com raio igual ou superior a 500 m.

Material e Métodos

Área de trabalho

Os procedimentos descritos neste trabalho foram integralmente desenvolvidos e validados em uma porção a leste do Distrito Federal e entorno. Na Figura 1, mostram-se os limites da área de estudo (quadrado vermelho). A maior parte da área de estudo está localizada na Bacia do Rio Preto, dentro dos limites do Distrito Federal, estendendo-se à Oeste, em direção à Bacia São Bartolomeu; à Leste, na porção da Bacia do Rio Preto, situada no Município de Formosa, GO; e ao Sul, englobando a parte superior da Bacia do Rio São Marcos.

A área apresenta duas estações bem definidas, uma úmida e chuvosa (outubro a abril) e outra seca (maio a setembro). Durante a estação seca, período selecionado para a construção da série temporal de evapotranspiração, o teor de água no solo diminui gradativamente em áreas de vegetação nativa (Cerrado), com $_{ref}$ lexos sobre a evapotranspiração das plantas e a umidade relativa do ar.

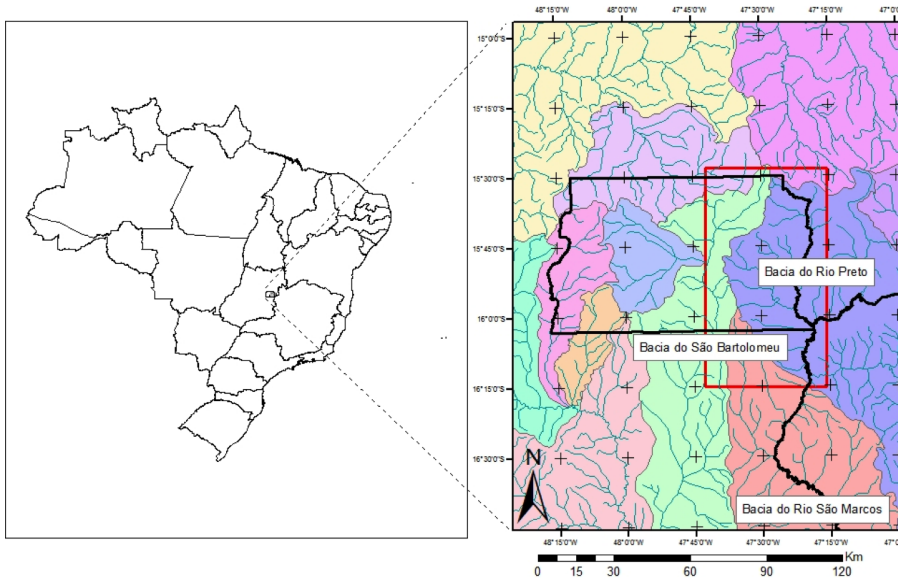


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Confeccionado a partir do Mapa da divisão política do Brasil.

Fonte: IBGE, 2010.

Durante os meses de maio a setembro, o Cerrado altera significativamente seu aspecto fisionômico no qual a vegetação verde e vigorosa fica gradativamente mais seca. Na área de estudo, a vegetação de Cerrado pode ser encontrada à Leste (porção da Bacia do Rio Preto, localizada em Formosa, GO) e à Oeste (Bacia do Rio São Bartolomeu).

A Bacia do Rio Preto, DF, está situada no centro da área de estudo. O uso do solo na bacia é basicamente agropecuário, com pouca ocorrência de áreas de Cerrado e matas de galeria. Destaca-se, na bacia, a agricultura irrigada, responsável por cerca de 80% da produção agrícola do Distrito Federal, sendo a irrigação realizada por pivô central com água captada diretamente dos cursos d'água ou pequenas barragens. Esse processo de retenção e armazenamento em barragens garante o fornecimento contínuo de água durante a época seca (RODRIGUES et al., 2007). Dessa forma, mesmo nos meses mais secos, é possível encontrar pivôs de irrigação com vegetação verde e bem desenvolvida com altas taxas de evapotranspiração.

Os processamentos das imagens de satélite foram realizados para a área destacada na Figura 1 (quadrado vermelho). Posteriormente, alguns pivôs de irrigação de feijão, situados na Bacia do Rio Preto, foram selecionados com objetivo de comparar as estimativas remotas com dados obtidos no documento FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

Materiais

Imagens de satélite

Para a estimativa da evapotranspiração real, foi utilizado o sensor Modis, sendo 12 imagens selecionadas em um período de 3 meses no ano de 2005 (Tabela 1). As imagens foram recortadas utilizando os limites da área de interesse.

Tabela 1. Data das imagens usadas na construção da série temporal de evapotranspiração.

Data de imageamento	Dia juliano	Satélite	Ângulo zenital (graus)
13/6/2005	164	Terra	4,18
15/6/2005	166	Terra	23,58
01/7/2005	182	Terra	23,13
06/7/2005	187	Terra	18,58
22/7/2005	203	Terra	18,67
24/7/2005	205	Terra	9,66
27/7/2005	208	Aqua	23,74
18/8/2005	230	Terra	23,13
23/8/2005	235	Terra	18,58
01/9/2005	244	Terra	4,46
10/9/2005	253	Terra	10,47
17/9/2005	260	Terra	4,07

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para obtenção da série temporal de evapotranspiração foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Cerrados, situada em Planaltina, DF, ao norte da área de trabalho. Os seguintes dados foram adquiridos na escala horária para todo o ano de 2005: radiação solar; velocidade e direção do vento, a 2 m de altura; temperatura e umidade relativa do ar, a 2 m de altura; e precipitação.

Softwares utilizados

Para o processamento das imagens de satélite e cálculo da evapotranspiração de referência, foram utilizados os softwares Erdas Imagine (GMBH Geosystems, 2009) e RefET (ALLEN, 2011), respectivamente.

Metodologia

No presente trabalho, a construção da série temporal de evapotranspiração foi executada em cinco etapas: (1) melhoria da resolução espacial da banda termal do Modis em todas as imagens usadas na construção da série temporal de evapotranspiração; (2) aplicação do modelo Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration – Metric (ALLEN et al., 2007) em uma imagem de referência para a obtenção da evapotranspiração real e da fração da evapotranspiração de referência ($ET_{ref}F$); (3) obtenção dos coeficientes de regressão linear na imagem de referência entre (A) a variável dependente – fração da evapotranspiração de referência ($ET_{ref}F$) – e (B) as variáveis independentes – NDVI, albedo e a fração da temperatura mínima –; (4) aplicação dos coeficiente de regressão linear em todas as imagens usadas na construção da série temporal de evapotranspiração; e (5) extrapolação temporal da $ET_{ref}F$ e sua associação com uma estação meteorológica, resultando em estimativas de evapotranspiração integradas temporalmente.

Melhoria da resolução espacial da banda termal do Modis

O produto de temperatura do Modis (MOD11), na resolução de 1 km, foi estimado com base no algoritmo “generalized split-window” (WAN; DOZIER, 1996), o qual assume um conhecimento a priori da emissividade. Mapas de emissividade das bandas 31 e 32 foram obtidos com base em classificação no qual o pixel da imagem é classificado de acordo com 14 classes de uso da terra pré-definidas e com os valores correspondentes de emissividade (SNYDER et al., 1998).

A melhoria da resolução espacial da banda termal tem sido feita por meio de técnicas estatísticas e de análise espacial, genericamente

denominadas em inglês de "*thermal sharpening*". No presente trabalho, o termo desagregar foi adotado como equivalente ao termo inglês *sharpening*, ou o procedimento para melhorar a resolução espacial de uma superfície numérica qualquer.

O procedimento de desagregação da temperatura do Modis foi aplicado em todas as imagens usadas na construção da série temporal. Para a desagregação da temperatura superficial, é necessário à utilização de parâmetros e (ou) variáveis auxiliares; sendo considerados parâmetros as características sobre a superfície da terra que afetam a temperatura (ex.: cobertura vegetal), enquanto variáveis são mudanças de estado que afetam igualmente a temperatura superficial (ex.: umidade do solo). Exemplos de parâmetros frequentemente utilizados em procedimentos de desagregação da banda termal incluem o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (KUSTAS et al., 2003) e a Fração Vegetada – FV (AGAM et al., 2007).

Para realizar a desagregação da temperatura, foram utilizados um parâmetro de vegetação e duas variáveis sensíveis à umidade superficial, respectivamente o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI, o Índice de Umidade por Diferença Normalizada – NDWI (GAO, 1996) e a componente *Wettness* da transformação *Tasseled Cap* – TCW (KAUTH; THOMAS, 1976; CRIST; CICONNE, 1984). No caso do sensor Modis, as bandas necessárias para se calcular esses três índices podem ser obtidas com resolução espacial de 500 m.

O NDVI é um índice de vegetação sensível à quantidade de biomassa verde, conteúdo de clorofila e, em menor intensidade, ao estresse hídrico das plantas. O NDVI foi calculado pela equação (TUCKER, 1979):

$$\text{NDVI} = \left(\frac{(\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{(\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}})} \right) \quad (1)$$

em que:

pnir = é a reflectância do infravermelho próximo.

pred = é a reflectância do vermelho.

O NDWI (Normalized Difference Water Index) é um índice aparentemente semelhante ao NDVI, mas, ao empregar a diferença entre as bandas do infravermelho próximo e médio, destaca a presença de moléculas de água no dossel das plantas (GAO, 1996):

$$\text{NDWI} = \frac{(\rho(0,86\mu\text{m}) - \rho(1,24\mu\text{m}))}{(\rho(0,86\mu\text{m}) + \rho(1,24\mu\text{m}))} \quad (2)$$

A TCW foi calculada por meio dos coeficientes disponíveis em Lobser e Cohen (2008), pelos quais as bandas espectrais são multiplicadas pelos coeficientes e somadas para se obter a componente Wetness.

O algoritmo utilizado na desagregação da temperatura foi baseado em estimativa por “mínimos quadrados”, sendo inspirado no algoritmo de Liu e Pu (2008) para melhoria da resolução espacial da radiância termal usando dados de emissividade da superfície. Inicialmente foi realizada a regressão linear entre a temperatura da imagem de baixa resolução (1 km) e os parâmetros-variáveis auxiliares NDVI, NDWI e TCW, com resolução espacial de 500 m (Figura 2). Essa estimativa foi obtida por mínimos quadrados considerando toda a imagem, ou seja, trata-se de uma estimativa global para a área de estudo.

A essa estimativa inicial (temperatura correspondente à resolução de 500 m) foi imposta uma restrição de preservação dos valores de temperatura da menor resolução (1 km), ou seja, o valor de temperatura observado na imagem de baixa resolução espacial pode ser novamente obtido ao realizar a média da temperatura da imagem desagregada. Isso foi realizado em três etapas: (1) inicialmente a média da estimativa de temperatura de todos os subpixels dentro do pixel de 1 km é obtida; (2) o valor de temperatura observado na resolução de 1 km (imagem original) é subtraído da estimativa de temperatura agregada na etapa 1; e (3) a diferença obtida na etapa 2 (positiva ou negativa) é adicionada a cada um dos subpixel. Essa estimativa da temperatura normalizada (temperatura estimada de 500 m com adição de erro) substitui a imagem de temperatura original de 1 km. O procedimento se repete de forma iterativa até o ponto em que não haja incremento no valor de correlação com os parâmetros e (ou) variáveis auxiliares.

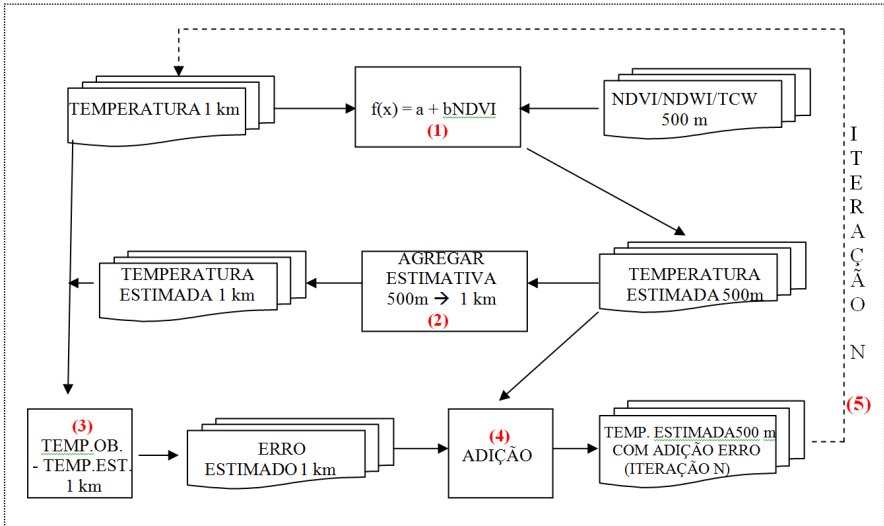


Figura 2. Fluxograma de processamento do algoritmo Global de desagregação da banda.

A fim de avaliar a qualidade da temperatura do Modis (MOD11) desagregada para a resolução de 500 m, esta foi comparada com a temperatura obtida pelo sensor Aster em uma imagem de referência. O produto de temperatura do Aster (AST08) é obtido pela aplicação do algoritmo “Temperature-Emissivity Separation” (TES) (GILLESPIE et al., 1998), no qual as estimativas de temperatura e emissividade ocorrem de forma simultânea. A imagem de temperatura do Aster (AST08) usada na validação cruzada, com resolução espacial de 90 m, foi degradada para 500 m, considerando explicitamente a função de espalhamento pontual do Modis.

Estimativa da ET_{ref} em uma imagem de referência usando a equação de balanço de energia

A evapotranspiração real foi calculada na imagem de referência usando o modelo Metric (ALLEN et al., 2007). O fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$) no Metric, que representa a energia utilizada no processo de evapotranspiração, é obtido pela equação de balanço de energia, uma vez conhecidos o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação:

$$\lambda ET = R_n - G_0 - H \quad (3)$$

em que:

λET – fluxo de calor latente ($W m^{-2}$).

R_n – saldo de radiação ($W m^{-2}$).

G – fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$).

H – fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

Em relação à proposta original de Allen et al. (2007), as únicas alterações feitas foram a utilização dos produtos de temperatura e radiação do Modis. Os produtos Modis utilizados foram o MOD11-L2 e o MOD01HKM. O MOD11-L2 é o produto de temperatura/emissividade gerado diariamente com resolução de 1 km a partir da aplicação do algoritmo “Split Window” (WAN; DOZIER, 1996). Conforme descrito anteriormente, as imagens de temperatura do Modis (MOD11-L2) tiveram suas resoluções espaciais melhoradas para 500 m. O MOD01HKM é o produto diário de radiação corrigida, tendo resolução espacial de 500 m. Nesse último caso, os valores de radiação foram transformados para $_{ref}$ radiação de superfície e albedo de acordo com a proposta de Tasumi et al. (2008). O detalhamento do modelo Metric está disponível em Allen et al. (2007).

A fração da evapotranspiração ($ET_{ref}F$) foi obtida para a imagem de referência utilizando-se a equação:

$$ET_{ref}F = ET_a/ET_{ref} \quad (4)$$

em que:

$ET_{ref}F$ – a fração da evapotranspiração.

ET_a – evapotranspiração real obtida por sensoriamento remoto, $mm dia^{-1}$.

ET_{ref} – evapotranspiração obtida em uma estação meteorológica, $mm dia^{-1}$.

Estimativa da $ET_{ref}F$ usando regressão linear

A $ET_{ref}F$, inicialmente estimada em uma imagem Modis de referência usando o Metric, foi correlacionada por meio de regressão linear com os parâmetros albedo, NDVI e FT_s , sendo esse último parâmetro a razão entre a temperatura superficial observada no pixel (T_s) e a mínima temperatura encontrada na imagem de referência ($T_{s;min}$):

$$FT_s = T_s / T_{s;min} \quad (5)$$

$$(ET_{ref}F)_{ref} = a (NDVI)_{ref} + b (\alpha)_{ref} + c (FT_s)_{ref} \quad (6)$$

em que:

$(ET_{ref}F)_{ref}$ – fração da evapotranspiração de referência (estação meteorológica) dos pixels de uma imagem selecionada como referência para obtenção dos parâmetros de regressão.

$(NDVI)_{ref}$ – índice de vegetação por diferença normalizada dos pixels da imagem de referência.

$(\alpha)_{ref}$ – albedo dos pixels da imagem de referência.

$(FT_s)_{ref}$ – fração da temperatura mínima dos pixels da imagem de referência.

A fração FT_s foi utilizada em detrimento da temperatura superficial, pois essa varia significativamente em função das condições meteorológicas (ex.: a radiação incidente sobre a superfície). Os coeficientes de regressão obtidos da imagem Modis de referência foram aplicados para estimar a $ET_{ref}F$ nas demais datas:

$$(ET_{ref}F)_i = a NDVI_i + b \alpha_i + c FT_{s;i} \quad (7)$$

em que:

$(ET_{ref}F)_i$ – fração da evapotranspiração de referência dos pixels de uma imagem selecionada no dia “i”.

$(NDVI)_i$ – índice de vegetação por diferença normalizada dos pixels da imagem selecionada no dia “i”.

$(\alpha)_i$ – albedo dos pixels da imagem selecionada no dia “i”.

$(FT_s)_i$ – fração da temperatura mínima dos pixels da imagem selecionada no dia “i”.

a, b e c – parâmetros de regressão obtidas da equação 4.

A $ET_{ref}F$ estimada por regressão linear foi comparada com a $ET_{ref}F$ estimada por meio do balanço de energia em todas as imagens utilizadas na construção da série temporal de evapotranspiração. O propósito dessa comparação foi avaliar em que medida a $ET_{ref}F$ obtida por regressão linear pode ser utilizada em detrimento da perspectiva mais complexa baseada na equação de balanço de energia, potencialmente tornando mais ágil o procedimento de construção da série temporal de evapotranspiração.

As estimativas de evapotranspiração obtidas remotamente foram utilizadas para a construção da curva do coeficiente do feijão (K_c do feijão) em cinco pivôs de irrigação selecionados na Bacia do Rio Preto, DF. O procedimento adotado foi semelhante ao descrito por Tasumi et al. (2005). Nesse último trabalho, os autores mostram que, em áreas agrícolas, sem estresse hídrico, os valores de evapotranspiração real situam-se em torno dos valores potenciais para diferentes culturas agrícolas. Ao realizar a média dos valores de evapotranspiração nos cinco pivôs de irrigação, foi possível estimar a curva K_c do feijão. Para fins de avaliação, os valores de K_c obtidos neste trabalho foram comparados com os coeficientes de cultura obtidos por Allen et al. (1998), sendo a data do plantio determinado em trabalho de campo realizado previamente.

Extrapolação temporal

Os valores de evapotranspiração foram integrados temporalmente na área de estudo entre os meses de maio a setembro de 2005. Para

calcular a evapotranspiração diária em cada pixel da imagem (Equação 8), os valores instantâneos da $ET_{ref}F$ foram considerados constantes na escala diária e multiplicados pela evapotranspiração medida em uma estação meteorológica durante o período de 24 horas.

$$(ET_{24})_i = (ET_{ref}F)_i(ET_{r,24})_i \quad (8)$$

Em que:

$(ET_{24})_i$ – estimativa diária da evapotranspiração em cada pixel da imagem no dia “i”.

$(ET_{ref}F)_i$ – fração da evapotranspiração de referência obtida no dia “i”.

$(ET_{r,24})_i$ – evapotranspiração medida em uma estação meteorológica de referência durante 24 horas no dia “i”.

A evapotranspiração do período foi obtida pela Equação 9:

$$ET_{período} = \sum_{i=m}^n (ET_{24})_i \quad (9)$$

Em que:

$ET_{período}$ – evapotranspiração de cada pixel da imagem em um determinado período.

$(ET_{24})_i$ – estimativa diária da evapotranspiração em cada pixel da imagem no dia “i”.

A análise visual da evapotranspiração integrada temporalmente foi utilizada para constatar, do ponto de vista qualitativo, a capacidade do procedimento proposto em relação à identificação de pivôs de irrigação com diferentes níveis de consumo d’água.

Resultados e Discussão

Desagregação da temperatura do Modis

A diferença média de temperatura de superfície encontrada entre o Modis (MOD11) e o Aster (AST08) na área de estudo, considerando a resolução de 1 km, foi de 2,71 K. Ao desagregar essa estimativa para 500 m, a diferença média aumenta para 2,72 K, com um incremento de apenas 0,01 K. Essa discrepância deve ser interpretada em termos relativos, ou seja, na comparação entre os algoritmos AST08 e MOD11-L2, sem necessariamente interpretar que o valor subestimado da temperatura desagregada seja resultante do algoritmo de desagregação. O coeficiente de determinação encontrado entre a temperatura do Modis desagregada para 500 m e a temperatura do Aster (AST08) foi de 0,91 (Figura 3).

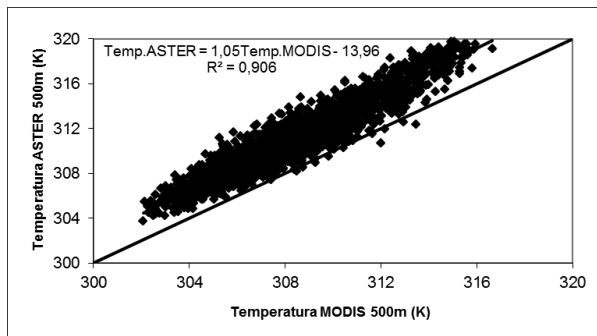


Figura 3. Comparação AST08 x MOD11A1 (desagregado): 500 m.

Na Figura 3, destaca-se a superestimativa da temperatura do Aster (AST08) comparativamente à temperatura do Modis (MOD11). Na bibliografia consultada, trabalhos comparativos mostraram discrepâncias em torno de +3 K a mais para o produto AST08 em relação ao MOD11 para áreas áridas e semiáridas (LIU et al., 2007; MERLIN et al., 2010). Na presente análise, essa discrepância é confirmada, sendo a temperatura do AST08 cerca de 2,7 K superior à temperatura do MOD11 na resolução de 1 km.

Ao analisar a emissividade das bandas termais utilizadas no algoritmo “Split Window” do produto MOD11, constatam-se valores médios muito altos, respectivamente, 0,985 e 0,989 para as bandas 31 e 32 do Modis. Esses valores de emissividade são muito próximos ao valor da emissividade da água pura (emissividade de $\sim 0,99$). Destaca-se, porém, que a imagem utilizada está em uma área essencialmente agrícola (Bacia do Rio Preto, DF e entorno), devendo possuir valores médios de emissividade inferiores. Essa sobrestimativa da emissividade ocasiona a depreciação da temperatura.

A emissividade em um determinado pixel do produto MOD11 é determinada por classificação no qual o pixel é atribuído a uma das 14 classes de uso da terra pré-definidas, sendo também considerados fatores dinâmicos, como a senescência da vegetação e o índice de vegetação (SNYDER et al., 1998). Os autores admitem que um problema do método proposto é não considerar a umidade da superfície.

Para a imagem trabalhada, as correlações da emissividade com o índice de vegetação (Figura 4a) e o índice de umidade (Figura 4b) são nulas, o que corrobora a constatação de inadequação da estimativa de emissividade pelo método da classificação para o entorno de Brasília.

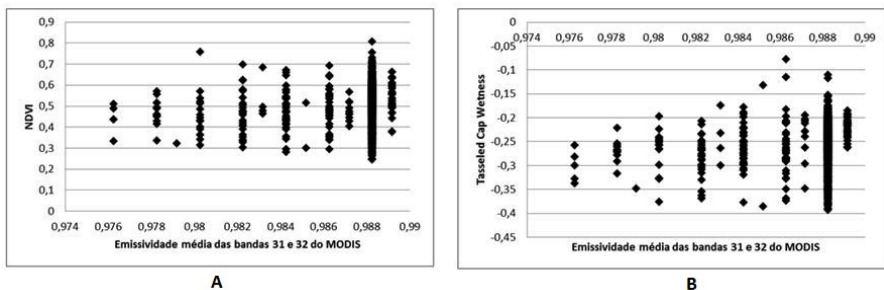


Figura 4. Emissividade comparada com o NDVI (a) e com a TCW (b).

A emissividade do produto MOD11, calculada pelo método de classificação (SNYDER et al., 1998), foi substituída pela emissividade calculada a partir do índice de área foliar (ALLEN et al., 2007) usando a seguinte fórmula (WARREN et al., 2012):

$$T_s = \frac{K_2}{\lambda \ln \left(\frac{K_1 \varepsilon_c}{\lambda^5 \varepsilon_{\text{MODIS11c}} B_c (T_{s_MOD11})} + 1 \right)} \quad (10)$$

Em que:

T_s é a estimativa da temperatura superficial com uma nova emissividade (K).

λ é o comprimento de onda médio das bandas 31 e 32 do Modis (μC^{-1}).

T_{s_MOD11} é a temperatura do produto MOD11 (K).

K_1 e K_2 são constantes universais do sensor Modis.

$\varepsilon\lambda$ é a emissividade média das bandas 31 e 32 do Modis (adimensional).

ε_{new} é a nova emissividade (adimensional), conforme proposta de Allen et al. (2007).

Ao substituir a emissividade obtida por classificação (SNYDER et al., 1998) pela emissividade calculada a partir do índice de área foliar (ALLEN et al., 2007), a diferença de temperatura entre o AST08 e o MOD11, na resolução de 500 m, praticamente diminuiu 1 K (Figura 5), de 2,72 para 1,73 K. A correlação aumentou de forma pouco significativa e o coeficiente angular se aproximou mais do valor unitário. A diferença relativa entre os produtos AST08 e MOD11 caiu 5%, de 15% para 10% após substituir a emissividade.

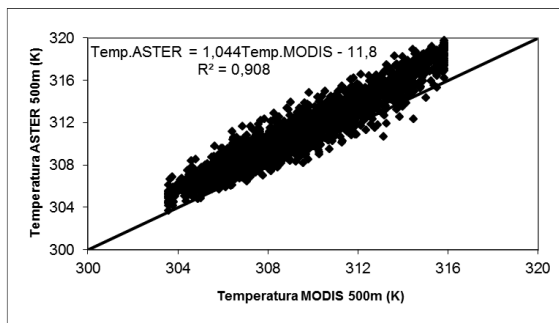


Figura 5. Comparação AST08 x MOD11A1 (desagregado e emissividade ajustada): 500 m.

Estimativa da $ET_{ref}F$ por regressão linear

A $ET_{ref}F$ foi calculada na imagem de referência (13/6/2005) por meio da aplicação do algoritmo Metric. A seguir, foi feita uma regressão linear entre a $ET_{ref}F$ e variáveis independentes NDVI, albedo e FT_s . Na Tabela 2, pode-se observar um alto valor do coeficiente de determinação ($r^2 = 0,995$), evidenciando que a variância da fração da evapotranspiração de referência pode ser explicada pelas variáveis independentes. Conforme a Equação 11, a temperatura e o albedo são inversamente correlacionados com a $ET_{ref}F$. Já o NDVI possui coeficiente positivo, ou seja, áreas vegetadas possuem maiores valores da $ET_{ref}F$. Relação semelhante foi observada por Teixeira (2010) no submédio São Francisco, que utilizou uma função exponencial para modelar a $ET_{ref}F$. O p-valor dos coeficientes são nulos, corroborando a importância das variáveis independentes para a explicação da $ET_{ref}F$.

$$(ET_{ref}F)_{estimada} = 0,873 - 0,054FT_s - 0,31Albedo + 0,29NDVI \quad (11)$$

Em que:

$(ET_{ref}F)_{estimada}$ – fração da evapotranspiração de referência estimada por regressão linear.

FT_s – a fração da temperatura mínima obtida por sensoriamento remoto.

Albedo – albedo bidirecional obtido por sensoriamento remoto.

NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada obtido por sensoriamento remoto.

Ao aplicar os coeficientes da regressão obtidos da imagem de referência em outras datas e comparar a $ET_{ref}F$ estimada pela regressão com a obtida pelo balanço de energia, constatou-se um bom ajuste, com valores de $r^2 > 0,93$ para todas as datas. Apesar da alta correlação, o erro médio absoluto tende a aumentar com o passar dos dias em relação à imagem de referência. No caso da última imagem processada (dia 17/9/2005), obtida 96 dias após a imagem de referência, por exemplo, o erro médio absoluto foi de 0,59. Isso ocorre em razão da aplicação

dos coeficientes de regressão para intervalos fora dos valores definidos na imagem de referência. Na área de trabalho, a superfície tende a ficar mais seca durante o período de junho a setembro (maior temperatura e albedo, menor índice de vegetação), o que pode produzir artificialmente valores de $ET_{ref}F$ negativos.

Tabela 2. Regressão entre $ET_{ref}F$ e NDVI, albedo e FTs.

	Coeficientes	Erro padrão (fração $ET_{ref}T$)	Estatística t	valor-P
Interseção	0,87	0,001	690,371	0
FT_s	-0,54	0,001	-471,458	0
Albedo	-0,31	0,002	-153,280	0
NDVI	0,29	0,002	149,066	0
R-quadrado ajustado	0,995			
Erro padrão	0,011			
Observações	4422			

Para contornar esse problema, os valores de $ET_{ref}F$, em todas as datas, foram normalizados entre 0 e 1,05 da evapotranspiração de referência, conforme valores de $ET_{ref}F$ assumidos pelo Metric (ALLEN et al., 2007). Para realizar essa normalização, foi utilizada a equação:

$$ET_{ref}F_{ajustada} = 1,05 \left[\frac{ET_{ref}F - ET_{ref}F_{min}}{ET_{ref}F_{max} - ET_{ref}F_{min}} \right] \quad (12)$$

Em que:

$ET_{ref}F_{ajustada}$ – fração da evapotranspiração de referência escalada entre os valores de 0 e 1,05.

$ET_{ref}F$ – fração da evapotranspiração de referência utilizando regressão linear.

$ET_{ref}F_{min}$ – mínima fração da evapotranspiração de referência da imagem obtida por regressão linear.

$ET_{ref}F_{max}$ – máxima fração da evapotranspiração de referência da imagem obtida por regressão linear.

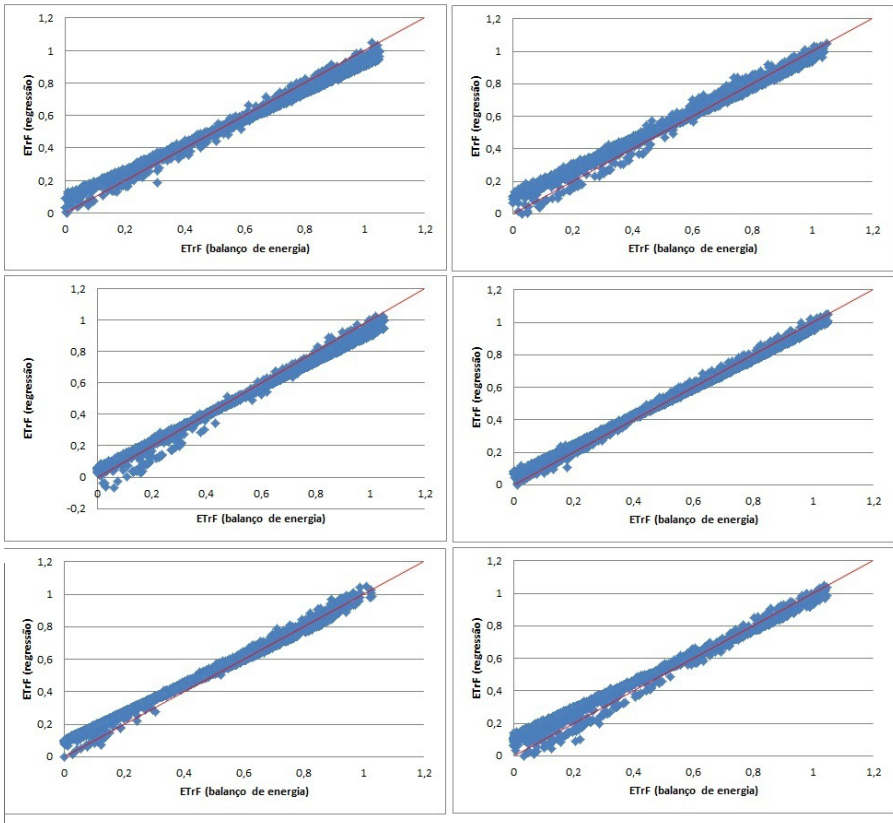
Por ser uma equação linear, os valores de correlação não se alteram, mas os desvios diminuem, sendo o maior valor observado de 0,058 da $ET_{ref}F$. Na Figura 6, mostra-se a comparação da $ET_{ref}F$ estimada por regressão linear e pelo balanço de energia após o ajuste usando a Equação 12. Conforme pode ser visualizado, existe uma boa concordância para todas as imagens analisadas.

Para as cinco áreas com feijão irrigadas com pivô, onde não há restrição hídrica e a evapotranspiração se aproxima da situação potencial, a média dos valores da $ET_{ref}F$ é equivalente ao coeficiente de cultura do feijão (K_c do feijão). O sistema de manejo utilizado nos pivôs foi o do plantio direto em palhada, conferindo uma maior proteção superficial do solo e, conseqüentemente, menores taxas de evapotranspiração no estágio de emergência das plantas. Na Figura 7, apresentam-se os valores da $ET_{ref}F$, obtidos remotamente por meio de regressão linear, e a curva de referência do K_c , conforme FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

Na Figura 8, apresentam-se as curvas de K_c provenientes das estimativas de $ET_{ref}F$, obtidas pelo balanço de energia e por regressão multivariada, ambas ajustadas por polinômios de terceiro grau. Nota-se que as curvas apresentam um comportamento bastante semelhante, com uma pequena discrepância no início das curvas, no qual a $ET_{ref}F$ estimada por regressão é ligeiramente superior à obtida pelo balanço de energia no início do ciclo. Essa tendência se inverte no final do ciclo.

Outro aspecto a ser observado é que os valores máximos da $ET_{ref}F$ obtidos pelos coeficientes de regressão tendem a ser ligeiramente superiores aos obtidos pelo balanço de energia. Mas as diferenças não chegam a ser expressivas, não ultrapassando 0,05 da $ET_{ref}F$ em nenhum momento do ciclo de desenvolvimento do feijão.

(A)



Continua...

Figura 6. Comparação da ET_{ref} obtida do balanço de energia e da regressão linear normalizada em todas as imagens analisadas.

(B)

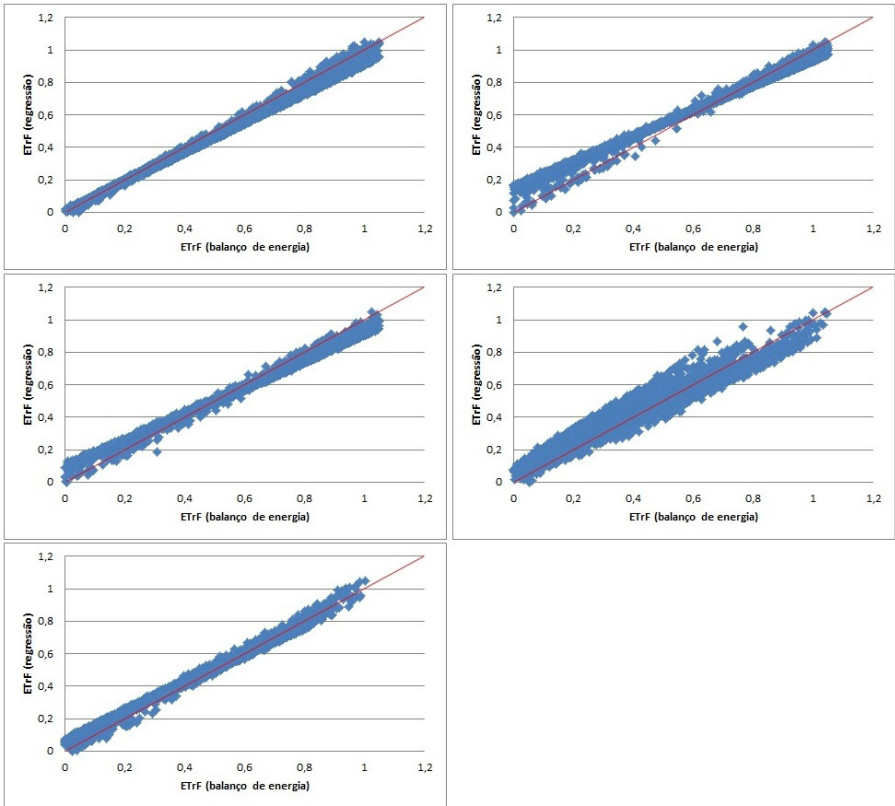


Figura 6. Continuação.

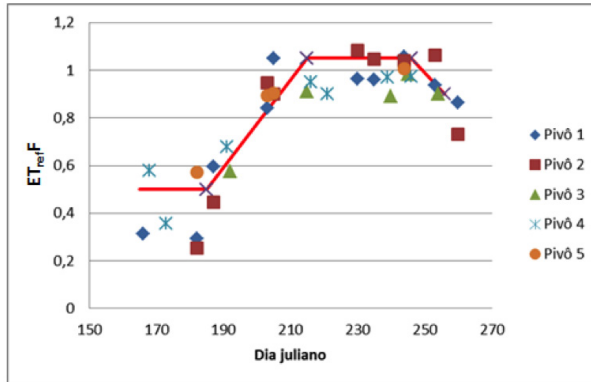


Figura 7. Coeficiente de cultura (Kc) e fração da evapotranspiração (ET_{ref}/F) para a cultura do feijão.

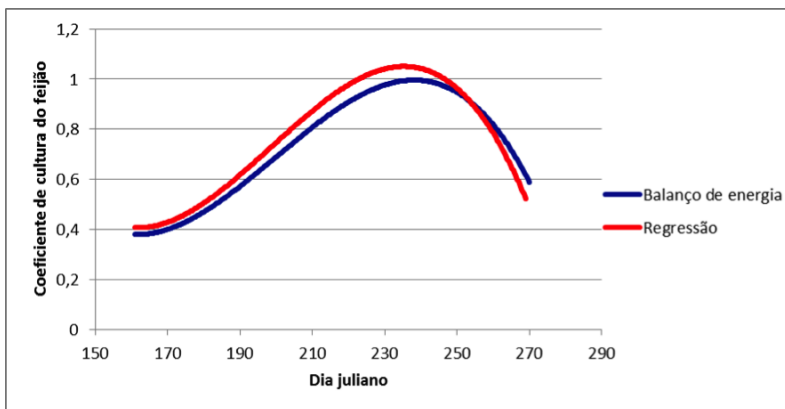


Figura 8. Curvas do coeficiente de cultura do feijão obtida remotamente por balanço de energia e regressão linear.

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a regressão linear pode ser utilizada na construção de séries temporais de evapotranspiração, tornando o procedimento mais ágil, já que apenas o balanço de energia da imagem de referência precisa ser executado.

Extrapolção temporal

A partir da estimativa da ET_{ref}/F em múltiplas imagens usando regressão linear, esses valores foram interpolados linearmente e associados

a valores obtidos na estação meteorológica da Embrapa Cerrados, conforme as Equações 8 e 9. Na Figura 9, mostra-se a estimativa de evapotranspiração integrada temporalmente entre maio e setembro de 2005 para alguns pivôs centrais na Bacia do Rio Preto. Nessa Figura, pode-se observar que alguns pivôs foram destacados (cores diferentes) em virtude de possuírem cobertura vegetal uniforme, com apenas uma cultura agrícola plantada. Os pivôs com menores valores de evapotranspiração, em amarelo e verde claro, não apresentaram área plantada em todo o período de junho a setembro de 2005. Nesses pivôs se observou o interstício de algumas semanas durante a plantação sucessiva de duas culturas agrícolas, período no qual os valores de evapotranspiração são praticamente nulos em função da ausência de irrigação.

Uma possível aplicação das estimativas de evapotranspiração é o cotejo com outorgas de uso da água, no qual áreas que apresentam discrepância em relação aos volumes consumidos e outorgados podem ser selecionadas para a fiscalização em campo. Nesse caso, as estimativas de evapotranspiração são utilizadas como indicativos indiretos do uso da água.

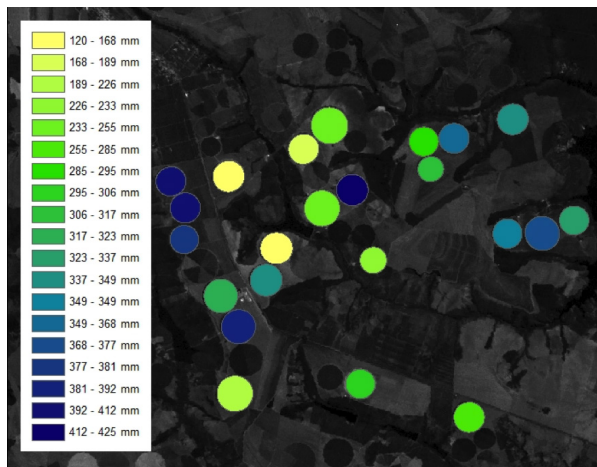


Figura 9. Estimativa sazonal (13/6/2005 a 17/9/2005) da evapotranspiração em pivôs centrais na Bacia do Rio Preto, DF.

Já a estimativa quantitativa de lâminas irrigadas é mais complexa, pois nem toda a água aplicada na irrigação é evapotranspirada. Nesse caso, deve-se realizar o balanço hídrico do solo. A lâmina irrigada pode ser estimada aplicando a equação de balanço hídrico no solo:

$$L = ET + D - P \pm \Delta S \quad (13)$$

Em que:

L – lâmina irrigada.

D – água drenada.

ET – evapotranspiração real.

ΔS – mudança da quantidade de água armazenada no solo.

P – precipitação.

Os componentes de evapotranspiração e o teor de água no solo podem ser estimados por sensoriamento remoto. A precipitação, para a época seca no entorno de Brasília, possui menor contribuição, mas sua estimativa pode ser feita pela interpolação de dados medidos em estações meteorológicas e (ou) produtos de sensoriamento remoto já operacionalizados e distribuídos gratuitamente (ex.: TRMM). Para obter o montante drenado de água no solo, é necessário conhecer a umidade do solo, obtida por sensoriamento remoto, e os parâmetros das curvas de retenção e condutividade da água no solo. Nesse caso, os parâmetros de solo podem ser obtidos por meio de equações de pedotransferência.

Conclusões

Para a melhoria da resolução espacial das estimativas de evapotranspiração real do Modis, foi inicialmente apresentado um algoritmo para a desagregação espacial da banda termal. A correlação entre as temperaturas superficiais obtidas pela Modis (desagregado para 500 m) e o Aster (agregado para 500 m) foi de 0,95, mas a diferença média dos dois produtos é de 2,71 K, em razão das diferenças entre os

algoritmos para calcular a temperatura do Modis e do Aster. Uma equação foi apresentada para alterar a emissividade do MOD11, permitindo diminuir a diferença entre o MOD11 e o AST08 em cerca de 1 K.

Para a construção da série temporal de evapotranspiração, a utilização de regressão linear, conjuntamente com o emprego da equação de balanço de energia em uma imagem de referência, possibilitou estimar uma sequência da $ET_{ref}F$ válida em toda a série temporal, com erro máximo de 0,06 (adimensional) em relação a $ET_{ref}F$ obtida pelo balanço de energia. Essa possibilidade constitui significativa redução de processamento; inclusive, uma vez conhecidos os parâmetros de regressão, a construção da série temporal de evapotranspiração pode ser realizada sem utilizar a equação de balanço de energia.

A análise do coeficiente de cultura do feijão em cinco pivôs de irrigação permitiu constatar a adequação do método proposto no monitoramento da evapotranspiração nos diferentes estágios fenológicos da vegetação, incluindo as fases de emergência das plantas, enchimento dos bulbos e senescência.

O monitoramento da evapotranspiração real em pivôs de irrigação por sensoriamento remoto constitui, potencialmente, importante ferramenta para aplicações como o manejo agrícola, a estimativa de uso consuntivo de bacias hidrográficas, a fiscalização de recursos hídricos, a análise da produtividade da água, a estimativa de biomassa e da produção agrícola.

Para a continuidade do trabalho, sugere-se a comparação das estimativas remotas diretamente com dados de evapotranspiração levantados em campo (ex.: Razão de Bowen, ou Correlações Turbulentas ou Lisímetro). Nesse caso, a validação seria baseada em dados coletados pontualmente (um pixel da imagem), mas, pela utilização do sensor Modis, seria possível construir uma série temporal com múltiplas imagens. No caso de uma cultura temporária, seria possível realizar a validação do procedimento aqui proposto considerando diferentes estágios fenológicos da cultura agrícola e condições superficiais de umidade no solo.

Referências

- AGAM, N.; KUSTAS, W. P.; ANDERSON, M. C.; LI, F.; NEALE, C. M. U. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, p. 545-558, 2007.
- ALLEN, R.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: 1998, 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, v. 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R. G. **Ref-ET**: reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho, 2011. Disponível em: < <http://www.kimberlyuidaho.edu/ref-et/> >. Acesso em: jan. 2011.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. **Formulation Journal of Hydrology**, v. 213, n. 1-4, p. 198-212, 1998.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1. da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 08 jan. 1997.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. Nova Iorque: Springer, 1998. 286 p.
- CHAVEZ, J. L.; NEALE, C. M.; PRUEGER, J. H.; KUSTAS, W. P. Daily evapotranspiration estimates from extrapolating instantaneous airborne remote sensing ET values. **Irrigation Science**, p. 67-81, 2008.
- CRIST, E. P.; CICONE, R. C. A physically-based transformation of Thematic Mapper Data - the TM Tasseled Cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674-2677, 1984.
- DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, 2002. 646 p.
- GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.
- GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; MATSUNAGA, T.; COTHERN, J. S.; HOOK, S.; KAHLE, A. B. A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne

Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p. 1113-1126, 1998.

GMBH GEOSYSTEMS. **ATCOR for ERDAS Imagine 2010**. Germering, GMBH GEOSYSTEMS, 2009. Disponível em: <www.geosystems.de/atcor/downloads/index.html>. Acesso em: jan. 2010.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, v. 26, n. 3, p. 223-237, 2008.

HONG, S. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from LANDSAT (30 m) to MODIS (250 m) scale. **Journal of Hydrology**, v. 370, p. 122-138, 2009.

IBGE. **Mapa da Divisão Política-Administrativa do Brasil**: 2010. Brasília, DF. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/politico-administrativo>>. Acesso em: mar. 2010.

JHORAR, R. K.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A.; VAN DAM, J. C. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 258, p. 198-213, 2002.

KALMAN, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 421-469, 2008.

KAUTH, R.; THOMAS, G.S. The tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. **LARS Symposia**, artigo 159, 1976.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; ANDERSON, M. C.; FRENCH, A. N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p. 429-440, 2003.

LIU, D.; PU, R. Downscaling Thermal Infrared Radiance for Subpixel Land Surface Temperature Retrieval. **Sensors**, v. 8, p. 2695-2706, 2008.

LIU, Y.; YAMAGUCHI, Y.; KE, C. Reducing the discrepancy between ASTER and MODIS land surface temperature products. **Sensors**, v. 7, p. 3043-3057, 2007.

LOBSER, S.; COHEN, W. MODIS tasseled cap: land cover characteristics expressed through transformed MODIS data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p. 5079-5101, 2008.

MERLIN, O.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; JACOB, F.; COUDERT, B.; CHEHBOUNI, G.; DEDIEU, G.; GARATUZA, J.; KERR, Y. Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using time series of Formosat-2 images. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2500-2512, 2010.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 77, p. 263-293, 1995.

RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na Bacia do Rio Preto. **Espaço e Geografia**, v. 10, p. 101-122, 2007.

SNYDER, W. C.; WAN, Z.; ZHANG, Y.; FENG, Y. -Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 2753-2774, 1998.

SU, Z.; PELGRUM, H.; MENENTI, M. Aggregation effects of surface heterogeneity in land surface processes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 3, n. 4, p. 549-563, 1999.

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p.85-99, 2002.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface τ_{ref} reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, p. 51-63, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops 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.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environments**, v. 8, p. 127-150, 1979.

WAN, Z.; DOZIER, J. A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, p. 892-905, 1996.

WARREN, M.S.; PERES, L.; RODRIGUES, L. N.; CAMPANA, N. A. Procedimento para Alteração da emissividade do produto de temperatura do MODIS – MOD11. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, p. 465-474, 2012.

Embrapa

Cerrados

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

G O V E R N O F E D E R A L
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA

CGPE 10855