

Estimativa da taxa de evaporação em um reservatório tropical a partir de dados orbitais obtidos pelo sensor MODIS

Marcelo Pedroso Curtarelli ¹
Carlos Alberto Sampaio de Araújo ¹
Enner Alcântara ²
José Luiz Stech ¹
João Antônio Lorenzetti ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DSR
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{mpedroso, carlos, stech, loren}@dsr.inpe.br

² Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP/FCT
Caixa Postal 468 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
enner@fct.unesp.br

Abstract. This work has the objective of estimate the evaporation rates from Itumbiara Reservoir, a tropical reservoir located in Brazil, using MODIS-derived water surface temperature (product MOD11A1) and meteorological data acquired over water surface. The evaporation rate was derived from latent heat flux, estimated through a mass transfer model. The estimates were carried out for the period between 1/1/2010 and 31/12/2010. The results showed that evaporation rate tends to increase from January to September and then decrease from September to December. The evaporation rate can reach values near 20 mm day⁻¹ in Itumbiara Reservoir during the dry season. The mean evaporation rate for wet season was 3.66 mm day⁻¹ and 8.25 mm day⁻¹ during the dry season. The total water volume evaporated from Itumbiara Reservoir during 2010 was estimated at about 1.7 billion of m³ (2,300 mm) which represents 10% of total reservoir volume. The advection seems to be the main transport mechanism which drives the evaporation in Itumbiara.

Palavras-chave: evaporation, tropical reservoirs, remote sensing, MOD11A1, evaporação, reservatórios tropicais, sensoriamento remoto, MOD11A1.

1. Introdução

A evaporação é um dos principais processos envolvido no balanço hídrico e de calor em lagos e reservatórios, sendo responsável por transferir grandes quantidades de água e energia (por meio do fluxo de calor latente) para a atmosfera (LENTERS et al., 2005). Desta forma, é de grande importância a quantificação acurada da taxa de evaporação nestes sistemas, para uma melhor compreensão do papel que desempenham na dinâmica do clima, tanto em nível local, como regional e até mesmo global (BATES et al., 1993).

A taxa de evaporação na superfície livre da água de um reservatório varia principalmente em função de forçantes meteorológicas, tais como radiação solar incidente, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica. Secundariamente, parâmetros de qualidade da água e características físicas do reservatório (p.ex. área superficial e profundidade) também podem afetar as taxas de evaporação (BRUTSAERT, 1982).

A taxa de evaporação é difícil de ser medida diretamente. Entretanto, existem diferentes métodos desenvolvidos para a estimativa indiretamente da taxa de evaporação, sendo os mais citados na literatura o método do balanço hídrico, balanço energético, transferência de massa, modelos híbridos (combinando balanço hídrico e energético), modelos empíricos e correlação de vórtices turbulentos (BRUTSAERT, 1982; MELESSE et al., 2009).

Convencionalmente estes métodos são aplicados utilizando dados medidos pontualmente, sem considerar a variação espacial e temporal da taxa de evaporação. Tal fato reflete em estimativas pouco confiáveis sobre grandes corpos d'água, como é o caso da maioria dos reservatórios destinados à geração de eletricidade no Brasil. Além disso, os altos custos e

logística envolvida para a coleta de dados *in situ* muitas vezes inviabiliza o monitoramento contínuo e com alta frequência temporal das variáveis meteorológicas e limnológicas envolvidas na estimativa da evaporação (STECH et al., 2006).

Desta forma, a utilização conjunta de dados coletados por sensores remotos e por estações telemétricas pode ser uma alternativa adequada para investigar a dinâmica espaço-temporal da evaporação nos grandes reservatórios hidrelétricos do Brasil. Esta abordagem apresenta as seguintes vantagens em relação ao método convencional: coleta contínua e sistemática de dados, coleta não intrusiva, visão sinótica de grandes áreas, possibilidade de avaliar a variação espacial da evaporação e maior frequência de amostragem.

Baseado neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estimar a taxa de evaporação no Reservatório da Usina Hidrelétrica de Itumbiara (Reservatório da UHE Itumbiara) utilizando dados coletados pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), dados telemétricos e um modelo de transferência de massa.

2. Metodologia de Trabalho

A área escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi o Reservatório da UHE Itumbiara. Este reservatório está localizado na bacia hidrográfica do Rio Paraná (18°25'S e 49°06'O), bioma Cerrado, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Goiás, região central do Brasil (Figura 1). Foi formado pelo barramento do rio Paranaíba, resultando na inundação de seus principais tributários, os rios Corumbá e Araguari.

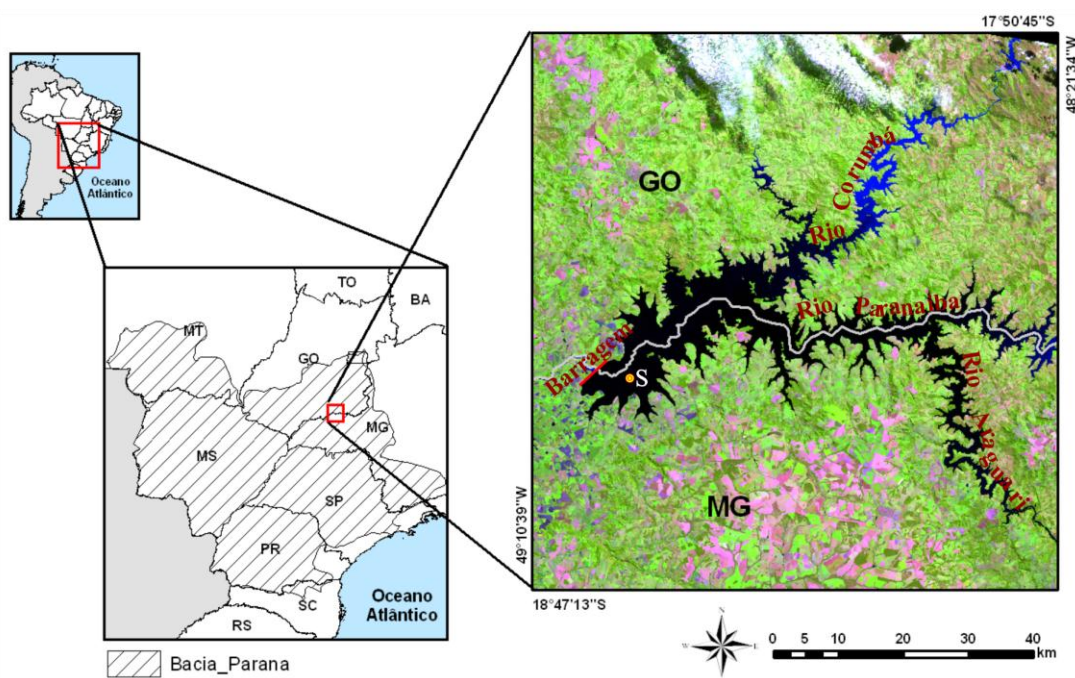


Figura 1. Localização do Reservatório da UHE Itumbiara, imagem Landsat5/TM composição R4G2B3. “S” indica a localização do SIMA no reservatório de Itumbiara.

2.1 Dados *in situ*

O conjunto de dados *in situ* utilizados neste trabalho compreendeu dados meteorológicos obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP/INMET), disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>, e de um Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA, STECH et al., 2006) fundeado no reservatório (ver localização na Figura 1). O SIMA consiste em um conjunto de *hardware* e *software* para a coleta de dados, climatológicos e limnológicos com alta frequência temporal, e monitoramento em tempo quase real de sistemas aquáticos. É composto por um sistema

independente formado por uma boia toroidal ancorada, na qual os sensores meteorológicos, limnológicos e a antena de transmissão de dados são fixados. Os dados são coletados automaticamente e transmitidos via enlace de satélites e de um sistema de recepção de sinais dos satélites. Maiores informações sobre o SIMA podem ser obtidas no portal <<http://www.dsr.inpe.br/hidrosfera/sima/sima.php>>. Os dados fluviométricos e de operação do reservatório foram fornecidos pela empresa Eletrobrás-Furnas. A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados *in situ* utilizados.

Tabela 1. Resumo dos dados *in situ* disponíveis para a estimativa da evaporação no Reservatório da UHE Itumbiara Itumbiara.

Variável	Frequência	Período	Fonte
Velocidade do vento	Horária	28/03/2009-01/09/2011	SIMA
Temperatura do ar	Horária	28/03/2009-01/09/2011	SIMA
Umidade relativa do ar	Horária	28/03/2009-01/09/2011	SIMA
Pressão atmosférica	3 vezes ao dia ¹	01/01/1970-16/04/2012	Rede INMET

¹ Medido nos horários sinóticos: 00:00, 12:00 e 18:00 (UTC).

2.2 Dados de sensoriamento remoto

O conjunto de dados obtidos por sensoriamento remoto utilizado neste trabalho compreendeu o produto MODIS/Terra V5 LST/E L3 *Global 1 km Grid* (MOD11A1), que fornece estimativas diárias (dia e noite) da temperatura da superfície da terra e corpos d'água continentais, com uma resolução espacial de 1 km. O produto MOD11A1 é gerado a partir de um algoritmo do tipo *split window* utilizando sete bandas espectrais do sensor MODIS (WAN, 2008). Estes dados já foram avaliados para a estimativa da temperatura e dos fluxos de calor em Itumbiara e são considerados confiáveis (ALCÂNTARA et al., 2010a). O produto MOD11A1 foi adquirido gratuitamente por meio do portal <<http://reverb.echo.nasa.gov/>>. Neste trabalho foram utilizadas apenas as estimativas de temperatura obtidas durante o dia.

2.3 Estimativa da evaporação diária

A estimativa da taxa de evaporação diária (E^* , mm dia⁻¹) no Reservatório da UHE Itumbiara, para o período entre 01/01/2010 e 31/12/2010, foi realizada utilizando um método aerodinâmico de transferência de massa, onde as estimativas de evaporação foram derivadas a partir do fluxo de calor latente (VERBURG; ANTENUCCI, 2010):

$$E^* = 8,64 \frac{E}{\rho_w L_v} \times 10^7 \quad (1)$$

onde, ρ_w é a densidade da água (kg m⁻³), L_v é o calor latente de vaporização (J kg⁻¹) e E é o fluxo de calor latente (W m⁻²) obtido por meio do método aerodinâmico (Equação 2):

$$E = \rho_a L_v C_E U_{10} (q_s - q_a) \quad (2)$$

onde, ρ_a é a densidade do ar (kg m⁻³), C_E é o coeficiente de transferência de calor latente, U_{10} é a intensidade do vento na altura padrão de 10 metros acima do nível da água (m s⁻¹), q_a é a umidade específica do ar em condições de não saturação (kg kg⁻¹) (Equação 3) e q_s é a umidade específica do ar na condição de saturação (kg kg⁻¹) (Equação 4):

$$q_a = \frac{0,038 R_h}{p} e^{[17,27T_a / (237,3 + T_a)]} \quad (3)$$

$$q_s = \frac{3,80}{p} e^{[17,27T_{MODIS}/(237,3+T_{MODIS})]} \quad (4)$$

onde, R_h é a umidade relativa do ar (%), p é a pressão atmosférica (mbar), T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e T_{MODIS} é a temperatura da superfície da água ($^{\circ}\text{C}$) obtida por meio do produto MOD11A1. Valores positivos de E indicam perdas de calor do reservatório para atmosfera; efeitos de condensação foram desprezados. O cálculo de todas as demais variáveis envolvidas nas estimativas do fluxo de calor latente e da evaporação foi realizado utilizando a formulação matemática apresentada em Verburg e Antenucci (2010). A estabilidade da atmosfera foi considerada nas estimativas do fluxo de calor latente através do ajuste do C_E em função de um parâmetro de estabilidade da atmosférica.

4. Resultados e Discussão

Das 365 imagens MODIS (produto MOD11A1) disponíveis para o ano de 2010, 203 imagens (57%) apresentaram condições livre de nuvens sobre o reservatório da UHE Itumbiara, sendo estas utilizadas na estimativa da evaporação diária. A maior parte das imagens descartadas devido à presença de nuvens foi durante os meses do verão (33%), quando a ocorrência de nuvens é mais frequente na região de Itumbiara.

A Figura 2 apresenta o fluxo de calor latente e a taxa de evaporação diária, estimados para o Reservatório da UHE Itumbiara durante o ano de 2010 utilizando as imagens MODIS. O fluxo de calor latente variou entre $-0,66 \text{ W m}^{-2}$ e -561 W m^{-2} , sendo os maiores valores observados durante os meses de inverno (Julho-Setembro). Este comportamento é similar ao observado por Verburg e Antenucci (2010) no lago Tanganyika, África, e pode ser explicado devido ao fato de que durante os meses de inverno a umidade do ar é tipicamente mais baixa na região de Itumbiara ($\sim 47\%$ de umidade relativa), aumentando assim o gradiente de umidade específica entre a superfície do reservatório e o ar (ver Equação 2), e consequentemente aumentando o fluxo de calor latente. Além disso, a intensidade do vento e a ocorrência de frentes frias são superiores durante os meses do inverno o que contribui para a intensificação do fluxo de calor latente (ALCÂNTARA et al., 2010b; CURTARELLI et al., 2012).

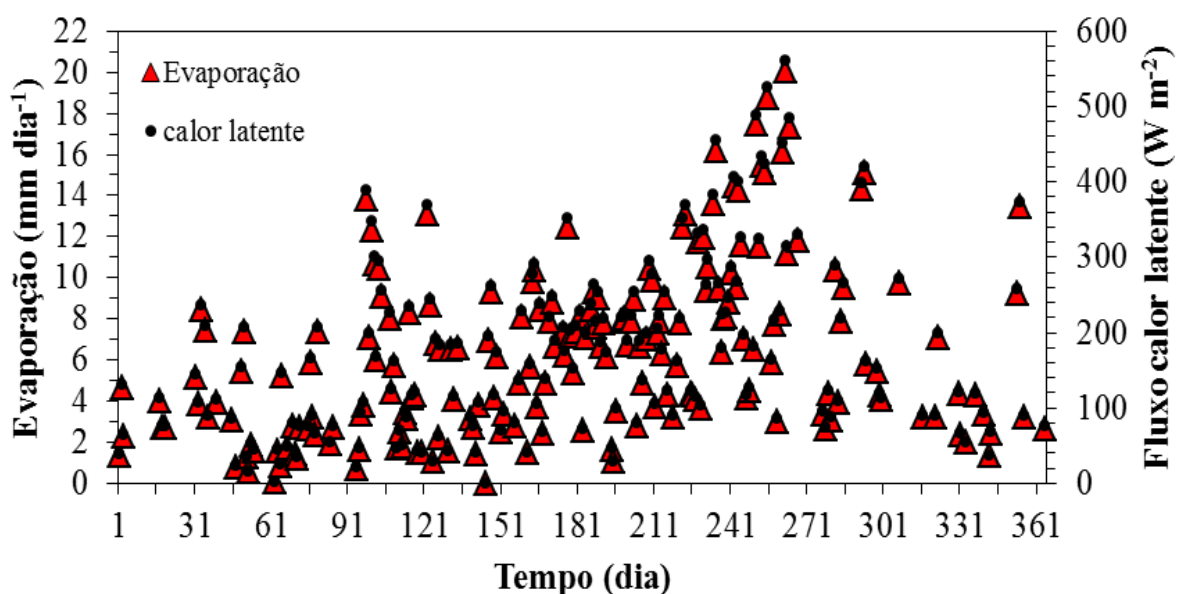


Figura 2. Fluxo de calor latente (pontos pretos) e evaporação diária (triângulos vermelhos) obtidos a partir das observações MODIS durante o ano de 2010 sobre o Reservatório da UHE Itumbiara na posição do SIMA (ver Fig. 1).

A taxa de evaporação diária estimada por meio das imagens MODIS para o ano de 2010 no Reservatório da UHE Itumbiara variou entre $0,1 \text{ mm dia}^{-1}$ e 20 mm dia^{-1} , e assim como o fluxo de calor latente, os maiores valores foram observados durante os meses de inverno (Julho-Setembro). A taxa de evaporação média diária obtida foi de aproximadamente $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$, variando entre $3,66 \text{ mm dia}^{-1}$ (meses do verão) e $8,25 \text{ mm dia}^{-1}$ (meses do inverno). Estes valores foram superiores aos observados por Hernandez (2007) no lago do Reservatório de Ilha Solteira ($4,9 \text{ mm dia}^{-1}$), entretanto a variação da taxa ao longo do ano apresentou comportamento semelhante.

A Figura 3 apresenta a variação da taxa de evaporação diária ao longo de 2010. Os meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro apresentam taxas de evaporação acima da média anual, enquanto que os demais meses apresentam taxas de evaporação inferiores à média. Setembro foi o mês que apresentou a maior taxa de evaporação ($11,3 \text{ mm dia}^{-1}$) e Março foi o mês que apresentou a menor taxa de evaporação ($2,75 \text{ mm dia}^{-1}$).

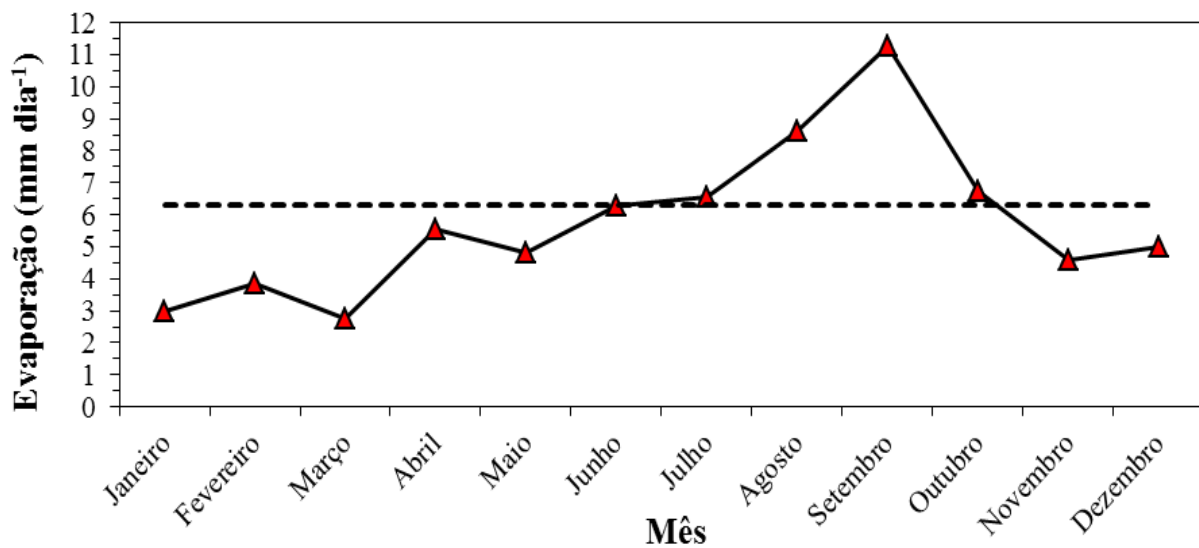


Figura 3. Evaporação média diária estimada para cada mês de 2010. A linha tracejada indica a média diária para o ano de 2010 ($6,3 \text{ mm dia}^{-1}$).

O total acumulado de água evaporada no Reservatório da UHE Itumbiara durante o ano de 2010 foi estimado em aproximadamente 2.300 mm , o que representa cerca de 114% do total precipitado neste ano ($2.018 \text{ mm ano}^{-1}$) e 4% da vazão de entrada ($1.213 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, valor médio para o ano de 2010). Considerando uma área inundada de 778 km^2 (ELETROBRAS-FURNAS, 2012) o volume de água evaporado durante o ano de 2010 no Reservatório da UHE Itumbiara foi da ordem de $1,7$ bilhões de m^3 , o que representa aproximadamente 10% do volume total do reservatório (17 bilhões de m^3). A título de comparação, a evaporação total anual foi estimada em cerca de 16,2% do volume útil do Reservatório de Sobradinho e aproximadamente 10,2% do volume útil do Reservatório de Ilha Solteira (PEREIRA, 2004; HERNANDEZ, 2007).

Vale ressaltar que a evaporação total estimada para o ano de 2010 por meio das imagens MODIS foi cerca de 42% inferior ao valor estimado por Assireu et al. (2012) para o período entre 15/02/09 até 16/04/10 ($3.950 \text{ mm ano}^{-1}$) utilizando dados medidos *in situ* e uma versão simplificada do método de Penman proposto por Linacre (1993). Apesar disto, o valor estimado por meio das imagens MODIS neste trabalho é coerente com a literatura, sendo semelhante aos valores encontrados por Hernandez (2007) para o Reservatório de Ilha Solteira, São Paulo, $1.772 \text{ mm ano}^{-1}$, e por Pereira (2004) para o Reservatório de Sobradinho, Bahia, $2.026 \text{ mm ano}^{-1}$.

4.2 Fatores ambientais que influenciam a evaporação em Itumbiara

A fim de verificar quais variáveis ambientais mais influenciaram na taxa de evaporação durante o ano de 2010 no Reservatório da UHE Itumbiara foi realizada uma análise da correlação entre a taxa de evaporação e algumas variáveis. A Figura 5 apresenta o resultado desta análise (valores normalizados). Dentre as variáveis selecionadas para esta análise, a temperatura do ar (Fig. 5a), temperatura da água (Fig. 5b) e pressão atmosférica (Fig. 5f) foram as variáveis que apresentaram menor correlação com a taxa de evaporação. Estas variáveis foram capazes de explicar apenas 1%, 7% e 8%, respectivamente, da variação observada na taxa de evaporação.

Por outro lado, velocidade do vento (Fig. 5e) e gradiente de umidade específica (Fig. 5d) foram as que apresentaram os maiores coeficiente de correlação com a taxa de evaporação. Estas variáveis foram capazes de explicar sozinhas cerca de 56% ($R^2= 0,56$ p-valor= $8,12 \times 10^{-38}$) e 25% ($R^2=0,25$ p-valor= $1,6 \times 10^{-14}$), respectivamente, da variação observada na taxa de evaporação.

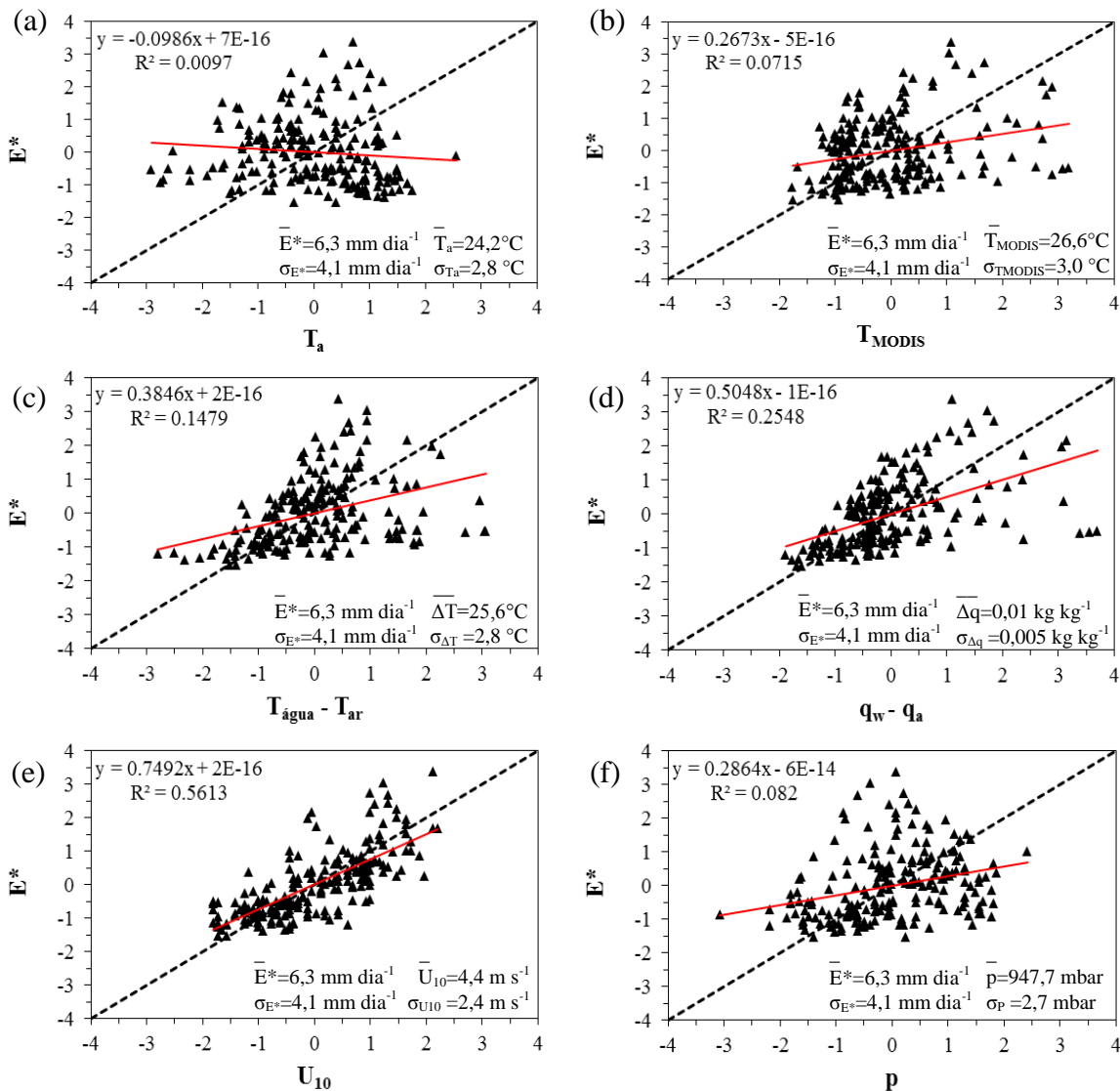


Figura 5. Variação da evaporação diária em função das variáveis ambientais (valores normalizados): (a) temperatura do ar, (b) temperatura da água, (c) gradiente de temperatura, (d) gradiente de umidade específica, (f) velocidade do vento e (g) pressão atmosférica. A linha preta tracejada indica o ajuste “ideal”; a linha vermelha apresenta a reta ajustada por regressão.

Vale ressaltar que a taxa de evaporação apresentou relação linear positiva de moderada a forte com o vento ($R=0,75$) e relação linear positiva moderada com o gradiente de umidade ($R=0,50$), ou seja, quanto maior a velocidade do vento e o gradiente de umidade do ar, maior é a taxa de evaporação. Estas características são observadas durante os meses do inverno em Itumbiara, quando a frequência de passagem de frentes frias é maior e a velocidade do vento pode alcançar 10 m s^{-1} e a umidade do ar atingir níveis críticos, abaixo dos 20% (CURTARELLI et al., 2012).

O gradiente de temperatura entre a superfície da água e o ar também apresentou baixa correlação com a taxa de evaporação, sendo capaz de explicar 15% ($R^2=0,15$ p-valor= $1,46 \times 10^{-8}$) da variação observada (Fig. 5c). Apesar disto, estas duas variáveis apresentaram uma relação linear positiva moderada ($\sim R=0,40$), ou seja, quanto maior o gradiente de temperatura entre a superfície do reservatório e o ar maior é a taxa de evaporação.

Os resultados encontrados aqui indicam que os mecanismos convectivos (i.e. devido ao gradiente de temperatura) possuem papel secundário no processo de evaporação no Reservatório da UHE Itumbiara, sendo mais importantes durante os meses de verão, quando a diferença de temperatura entre a água e o ar é maior e a intensidade do vento é menor. Durante os meses de inverno os mecanismos advectivos (i.e. ação mecânica do vento renovando as massas de ar sobre o reservatório) são mais eficientes, renovando as massas de ar sobre o reservatório constantemente.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de dados coletados por estações telemétricas e pelo sensor MODIS (produto MOD11A1) na estimativa da taxa de evaporação no Reservatório da UHE Itumbiara utilizando um modelo de transferência de massa. As principais conclusões são:

O Reservatório da UHE Itumbiara perde em média $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$ por meio da evaporação, o que representa aproximadamente $4,5$ milhões de $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$. As perdas de água por evaporação são maiores durante os meses do inverno ($8,25 \text{ mm dia}^{-1}$) do que nos meses de verão ($3,66 \text{ mm dia}^{-1}$) em Itumbiara.

Aproximadamente 10% do volume total do Reservatório da UHE Itumbiara é evaporado ao longo do ano, o que representa aproximadamente $1,7$ bilhões de m^3 de água que são transferidos do reservatório para a atmosfera em forma de umidade.

A taxa de evaporação no Reservatório da UHE Itumbiara é primeiramente controlada pela ação do vento (processos advectivos) e pelo gradiente de umidade entre a superfície do reservatório e o ar. Secundariamente, os processos convectivos também contribuem para a evaporação em Itumbiara.

A utilização de dados MODIS (produto MOD11A1) e telemétricos para a estimativa da evaporação em reservatórios hidrelétricos tropicais se mostrou uma boa alternativa a falta de dados coletados *in situ*. Apesar da moderada resolução espacial do produto MOD11A1 (1 km), que muitas vezes inviabiliza seu uso para pequenos corpos d'água, é possível extrair uma grande quantidade de *pixels* puros na maioria dos reservatórios brasileiros, devido a sua grande extensão. Além disso, sua resolução temporal (2 imagens por dia) é considerada adequada para estudo de sistemas aquáticos.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a ELETRONORTE, projeto “Desenvolvimento de um sistema indicador de qualidade de água específico para a região Amazônica” (contrato n.º 4500075234) pelo fornecimento da bolsa de doutorado. Os autores também agradecem a

empresa FURNAS Centrais Elétricas e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento de dados para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, E.H.; STECH, J.L.; LORENZZETTI, J.A.; BONNET, M.-P.; CASAMITJANA, X.; ASSIREU, A.T.; NOVO, E.M.L.M. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2651-2665, 2010a.

ALCÂNTARA, E.H.; BONNET, M.-P.; ASSIREU, A.T.; STECH, J.L.; NOVO, E.M.L.M.; LORENZZETTI, J.A. On the water thermal response to the passage of cold fronts: initial results for Itumbiara reservoir (Brazil). **Hydrology Earth Science System Discussion**, v. 7, p. 9437-9465, 2010b.

ASSIREU, A.T.; BENFERHAT, E.; PIMENTA, F. Balanço hídrico em reservatórios hidrelétricos e geração local de energia eólica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XVII, (CBMET), Gramado. **Anais...** Gramado: SBMET, 2012, p. 1-5. On-line. Disponível em: <http://www.eventweb.com.br/cbmet2012/specificfiles/manuscripts/index.php?file=cbmet2012/10606_1342105156.pdf>. Acesso em: 05 Out 2012.

BATES, G.T.; GIORGI, F.; HOSTETLER, S. W. Toward the simulation of the effects of the Great Lakes on regional climate. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 1373-1387, 1993.

BRUTSAERT, W.H. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: D. Reidel, 1982. 299 p.

CURTARELLI, M.P.; RENNÓ, C.D.; ALCÂNTARA, E.H. Effects of cold front passage and atmospheric boundary layer stability in the estimates of spatially distributed heat fluxes in a tropical reservoir. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2012, (IGARSS), Munique. **Anais...** Munique: IEEE, 2012. p. 5246-5249. DVD.

ELETOBRAS-FURNAS. **Sistema ELETROBRAS-FURNAS**. Disponível em <<http://www.furnas.com.br/>>. Acesso em 25 Set 2012.

HERNANDEZ, F.B.T. **Análise agroclimática da área de influência do reservatório da usina hidrelétrica de Ilha Solteira, região noroeste do Estado de São Paulo**. Ilha Solteira: UNESP, FEPISA e SEAP/PR (Convênio 80/2005), 2007. 27 p. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/parque_aquicola_agroclimatologia_noroeste_sp.pdf>. Acesso em: 20 Set 2012.

LENTERS, J.D.; KRATZ, T.K.; BOWSER, C.J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA). **Journal of Hydrology**, v. 308, p. 168-195, 2005.

LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.64, p.237-256, 1993.

MELESSE, A.M.; ABTEW, W.; DESSALEGNE, T. Evaporation estimation of Rift Valley lakes: comparison of models. **Sensors**, v. 9, p. 9603-9615, 2009.

PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

STECH, J.L.; et al. Telemetric Monitoring system for meteorological and limnological data acquisition. **Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie**, v. 29, p. 1747-1750, 2006.

VERBURG, P.; ANTENUCCI, J.P. Persistent unstable atmospheric boundary layer enhances sensible and latent heat loss in a tropical great lake: Lake Tanganyika. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 1-13, 2010.

WAN, Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, p. 59-74, 2008.