

EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DE PRODUTOS ORBITAIS PARA O ESTADO DO RIO DE JANEIRO

ALLAN WERNER DOS ANJOS¹; RAFAEL COLL DELGADO²; GUSTAVO BASTOS LYRA²; LEONARDO PAULA DE SOUZA³ E EDUARDO RIBEIRO SUHETT⁴

¹Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus UFRRJ, 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: allanwerner28@hotmail.com

²Meteorologistas, Professores Doutores do Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus UFRRJ, 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: rafaelcolldelgado32@gmail.com; gblyra@ufrj.br

³Engenheiro Agrícola, Professor Doutor do Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Rio Branco, Acre, Brasil, e-mail: leonardo.acre@gmail.com

⁴Engenheiro Florestal, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE/DGC, Parada de Lucas, Rio de Janeiro, Brasil, eduardo.suhett@ibge.gov.br

1 RESUMO

Devido à preocupação com a qualidade e quantidade de água disponível para o consumo humano, é importante o manejo correto dos recursos hídricos, proporcionando uma melhor eficiência na absorção de água pelas plantas. O presente trabalho, tem como objetivo estimar a Evapotranspiração (ET) a partir do sensor MODIS por meio da validação do modelo proposto por Nagler et al. (2005), correlacionar com valores obtidos por Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) situadas no estado do Rio de Janeiro para o ano de 2003, e por fim, comparar com diferentes coberturas do solo para cada estação do ano. A análise estatística apresentou resultados satisfatórios dos valores de ET obtidos pelo sensor MODIS, porém é importante que haja uma maior representatividade das EMS no estado para estudos futuros. Para a EMS de Maricá houve uma melhor correlação ($r^2 = 0,78$, $r = 0,88$, $d = 0,49$, $EPE = 0,13 \text{ mm d}^{-1}$ e $VM = -0,09 \text{ mm d}^{-1}$), podendo estar relacionado às condições climáticas próximas à região de onde o modelo de ET foi desenvolvido. A distribuição espacial dos valores de ET foi comparada com base na sazonalidade, sendo que o período de verão apresentou ET mais elevada ($7,82 \text{ mm d}^{-1}$). Para o inverno, houve menor amplitude dos valores de ET, atingindo o máximo de $5,83 \text{ mm d}^{-1}$. Os resultados servem como subsídio para estimativas de demanda hídrica da vegetação, como também para estudos de produtividade de fitomassa e mudança da paisagem.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, geoprocessamento, MODIS, Penman-Monteith.

ANJOS, A. W.; DELGADO, R. C.; LYRA, G. B.; SOUZA, L. P.; SUHETT, E. R.
EVAPOTRANSPIRATION FROM ORBITAL PRODUCTS TO THE STATE OF RIO DE JANEIRO

2 ABSTRACT

Because of concerns about the quality and quantity of water available for human consumption, the correct management of water resources is important, providing better efficiency in the absorption of water by plants. This work aims to estimate the

Evapotranspiration (ET) from the MODIS sensor by validating the model proposed by NAGLER et al. (2005), correlate with values obtained by Surface Weather Stations (SWS) located in the state of Rio de Janeiro in 2003, and compare with different ground covers for each season. Statistical analysis showed satisfactory values of ET obtained by the MODIS results, however it is important to have a greater representation of SWS in the state for future studies. For Maricá SWS there was a better correlation ($r^2 = 0.78$, $r = 0.88$, $d = 0.49$, $EPE = 0.13 \text{ mm d}^{-1}$ and $VM = -0.09 \text{ mm d}^{-1}$), which may be related to the closeness of a region where the climate model was developed ET. The spatial distribution of ET values were compared based on seasonal aspects, with the summer period presenting higher ET (7.82 mm d^{-1}). For winter, a lower range of ET values, reaching a maximum of 5.83 mm d^{-1} was observed. The results serve as input for estimates of water demand of vegetation, but also for studies of productivity and biomass change of scenery.

Keywords: remote sensing, geoprocessing, MODIS, Penman-Monteith.

3 INTRODUÇÃO

Em função da crescente demanda hídrica para fins domésticos, industriais e, principalmente, agropecuários, a humanidade, até algumas décadas atrás, considerava a água como um recurso infinito e que a capacidade de autodepuração dos corpos de água também o era (MARQUES et al., 2007). Os mesmos autores destacam ainda, que nas últimas décadas, o crescimento industrial e o aumento populacional e da produtividade agrícola tiveram como consequência a preocupação com a qualidade e disponibilidade de água para o consumo humano.

O manejo racional dos recursos hídricos na agricultura proporciona melhor eficiência no processo de absorção de água pelas plantas e assim, reduzindo consideravelmente o seu desperdício. A necessidade de determinar a demanda de água para atender o consumo das culturas agrícolas, aliada ao correto dimensionamento do sistema de irrigação é o principal parâmetro para o uso sustentável da água. A base para se quantificar o consumo de água de determinada vegetação, está comumente associada à capacidade da superfície do solo e da vegetação de transferir água para a atmosfera (ESTEVES et al., 2010).

A evapotranspiração (ET) é definida como a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água e de transpiração das plantas, ou seja, é a perda total de vapor de água do sistema solo-planta para a atmosfera (MEDEIROS, 2002). A ET pode ser estimada por meio de modelos empíricos ou físico-fisiológicos em função dos elementos meteorológicos. Os modelos são desde os mais simples, como os baseados apenas na temperatura do ar (e.g. Thornthwaite e Hargreaves-Samani), até os mais complexos, que envolvem o balanço de energia ao nível da vegetação, como o modelo de Penman-Monteith. Entretanto, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto vem sendo utilizada em situações onde há restrição ou inexistência de observações meteorológicas.

Os métodos de determinação da Evapotranspiração real (ET_r) baseados em sensoriamento remoto se mostram úteis, pois são capazes de propiciar a sua estimativa em áreas com grande heterogeneidade e dimensão (BEZERRA, SILVA; FERREIRA, 2008), ao contrário de métodos micrometeorológicos, como o método das correlações de vórtices turbulentos, da razão de Bowen e medidas diretas com lisímetros.

A possibilidade de coleta de informações detalhadas ao longo de extensas áreas agrícolas ou de vegetação, em um curto período de tempo e quantificação de parâmetros

físicos da superfície terrestre como a temperatura da superfície, índices de vegetação e mudança da paisagem com alta resolução temporal e espacial são as principais vantagens na obtenção de dados via sensoriamento remoto (DELGADO et al., 2012; FREITAS et al., 2012).

De acordo com Zhang et al. (2009), os produtos MODIS estão disponíveis desde o ano de 2000, e assim constitui-se de uma das fontes mais confiáveis no que se refere a estudos de grande escala ou até mesmo de escala global. As aplicações dos produtos MODIS, resultam em uma série de informações distribuídas no espaço. Uma delas é a ET, que pode ser obtida através do MOD15, que disponibiliza o Índice de Área Foliar (IAF) (*Leaf Area Index - LAI*) e a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation - FPAR*) absorvida pela vegetação, fornecidos diariamente ou em intervalos de oito dias (CUNHA; ALVALÁ; OLIVEIRA, 2013).

Com o objetivo de estimar a evapotranspiração real diária de forma direta e sem a necessidade de quantificar outros complexos processos hidrológicos, surgem algoritmos operacionais e modelos como, por exemplo, o proposto por Nagler et al. (2005), desenvolvido nos Estados Unidos da América para a vegetação ripária ao longo do Middle Rio Grande River, Novo México. Trata-se de um método que leva em consideração o Índice de Vegetação (IV) (*Vegetation Index - VI*) para estimar a ET a partir do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). Na elaboração desse método, os dados de ET obtidos por meio de quatro estações meteorológicas de superfície foram correlacionadas com VI e Temperatura da Superfície Terrestre (TST) (*Land Surface Temperature - LST*) gerados a partir do MODIS (NAGLER et al., 2005).

Durante quatro anos para quatro tipos de sítios diferentes ao longo da zona ripária do Middle Rio Grande River, foram feitas análises de correlação e regressão da ET. As análises foram obtidas pelas estações com os dados de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*), EVI (*Enhanced Vegetation Index - EVI*) e LST do sensor MODIS.

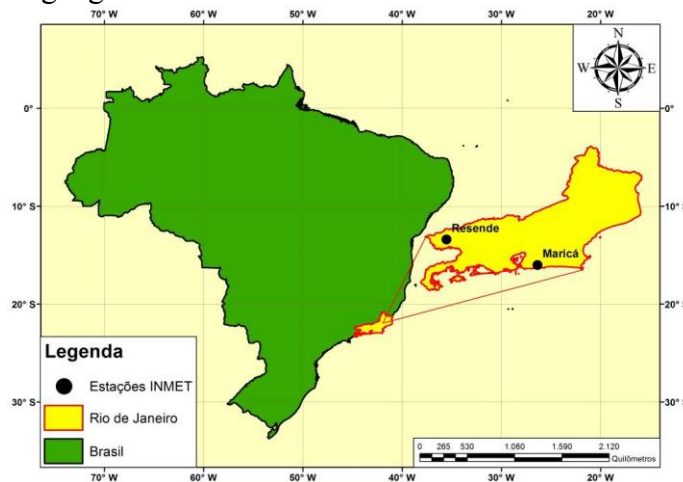
Entre o EVI e o NDVI, o primeiro apresentou maior correlação com os dados de ET obtidos em campo, principalmente pelo fato de que o EVI incorpora informações das bandas do azul, vermelho, e infra-vermelho próximo, e o NDVI somente as bandas do vermelho e infra-vermelho próximo. Plantas sob estresse hídrico apresentam alterações nos valores de clorofila a e b (EMBRY; NOTHNAGEL, 1994), diferenças que são perceptíveis principalmente na faixa do azul. Além disso, o NDVI é significativamente saturado em regiões com alta concentração de biomassa (HUETE et al., 2002).

O presente trabalho teve como objetivo estimar a ET a partir do sensor MODIS por meio da validação do método proposto por Nagler et al. (2005), correlacionar com as estimativas de ET pelo método de Penman-Monteith baseadas nas observações de Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) situadas no estado do Rio de Janeiro para o ano de 2003, e por fim, comparar a sua relação com diferentes coberturas do solo para cada estação do ano.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo foi o estado do Rio de Janeiro, localizado entre as latitudes 20°45'45" e 23°22'10" S e longitudes 40°57'20" e 44°53'20" W (Figura 1), com área de 43.864,3 km².

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

Situado na região sudeste do Brasil, o estado está totalmente inserido no Bioma Floresta Atlântica, e apresenta ainda importantes fragmentos de florestas nativas. Com relevo tipicamente acidentado, o uso e ocupação da terra é constituído principalmente por pastagens, áreas urbanas e alguns tipos de agricultura, de acordo com cada região e fragmentos florestais remanescentes do bioma Mata Atlântica (CRUZ et al., 2009).

O estado está dividido geopoliticamente em 92 municípios, inseridos em oito regiões de governo: Região Norte Fluminense (RNF), Região Noroeste Fluminense (RNoF), Região Serrana (RG), Região Centro Sul Fluminense (RCSF), Região Baixadas Litorâneas (RBL), Região Metropolitana (RM), Região Médio Paraíba (RMP) e Região Costa Verde (RCV) (CEPERJ, 2014).

Devido ao relevo complexo, altitude e fenômeno da continentalidade/maritimidade, o estado do Rio de Janeiro apresenta diferentes padrões climáticos. Outro fator que contribui para a diversidade climática da área de estudo é a atuação dos sistemas meteorológicos de grande escala (Sistemas Frontais – SF, Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS e Alta Subtropical do Atlântico Sul – ASAS), principalmente quando interagem com o relevo (ANDRÉ et al., 2008).

4.2 Produtos orbitais e dados meteorológicos de superfície

Para estimativa da Evapotranspiração pelo método de NAGLER et al. (2005), utilizaram-se os produtos MYD11A2 e MYD13A2 com resolução espacial de 1 km, gerados a partir do sensor MODIS, a bordo do satélite AQUA/EOS PM-1 (Aqua/Earth Observing System PM-1) com horário de passagem as 13:30 horas. As imagens foram obtidas por meio do “United States Geological Survey – Global Visualization Viewer” (USGS – GLOVIS), disponíveis no link <http://glovis.usgs.gov/>.

Utilizando a plataforma do USGS – GLOVIS, foram selecionadas imagens de janeiro a dezembro de 2003, correspondentes aos tiles H13V11 e H14V11, que abrangem todo o limite da área de estudo. Com o objetivo de fornecer imagens livres de nuvens e com correção atmosférica, os produtos MYD11A2 e MYD13A2 são gerados a partir da média dos valores entre 1 a 8 e 1 a 16 dias, respectivamente (LATORRE et al., 2003).

Para correlacionar os valores estimados de ET pelo sensor com os valores observados pelas EMS, foi necessário trabalhar com imagens em que o dia das medições observadas estivesse inserido nos intervalos temporais de cada produto, nesse caso, o dia 15 de todos os

meses. Dessa forma, foram adquiridas duas imagens para cada produto e dois produtos para cada mês ao longo de um ano, o que totalizou 48 imagens em projeção sinusoidal contínua e em Formato de Dados Hierárquicos (FDH) (*Hierarchical Data Format – HDF*).

Posteriormente, os dados disponibilizados em projeção sinusoidal e em formato HDF foram convertidos para a projeção Sistema de Coordenadas Geográficas (SCG) (*Geographic Coordinate System – GCS*) e formato Geotiff por meio do software *Modis Reprojection Tool* (MRT). Este programa também possibilitou a realização do mosaico dos tiles H13V11 e H14V11, assim como, permitiu selecionar a banda LST do produto MYD11A2 e a banda EVI do produto MYD13A2.

As séries dos elementos meteorológicos de superfície (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e insolação) para o ano de 2003 utilizadas na determinação de ET pelo método de Penman-Monteith padrão boletim FAO56 (ALLEN; PEREIRA; RAES, 1998) foram obtidas nas estações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) situadas no municípios de Resende (22,44° S; 44,43° W; 440 m) e Maricá (22,91° S; 42,81° W; 4 m).

4.3 Estimativa da evapotranspiração

Modelo de NAGLER et al. (2005)

Para aplicação do modelo proposto por Nagler et al. (2005) foram necessários alguns ajustes dos dados de índice de vegetação e de temperatura da superfície, como também outros processamentos de imagens por meio do software ArcGIS 10.1®. Os ajustes foram feitos somente na área de estudo, com o objetivo de otimizar o processamento das imagens.

Foi realizado o recorte da área de estudo com os limites do estado do Rio de Janeiro em formato *shapefile*, obtidos pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Os dados do produto MYD11A2 disponibilizados em 16 bits foram convertidos para temperaturas em Kelvin (K) (Equação 1) e em seguida para graus Celsius (°C) (Equação 2) utilizando as seguintes equações:

$$TK = MYD11A2 \times 0,02 \quad (1)$$

$$Tc = TK - 273,15 \quad (2)$$

Em que, TK é a temperatura em Kelvin e Tc é a temperatura em Grau Celsius.

Além disso, o EVI disponível no produto MYD13A2 possui escala de -1 a 1 e, por isso, foi necessário reescalonar os dados para valores positivos (EVI*) de acordo com a Equação 3.

$$EVI^* = \frac{EVI + 1}{2} \quad (3)$$

Em que, EVI* é o *Enhanced Vegetation Index* ajustado e EVI é o *Enhanced Vegetation Index*.

Em seguida, os dados ajustados de LST e de EVI foram aplicados na equação de evapotranspiração proposta por Nagler et al. (2005) descrita a seguir:

$$ET = 0,355(1 - \exp^{-2,28 \times EVI^*}) \times (Tc - 20,3) + 0,70 \quad (4)$$

Em que, ET é a evapotranspiração diária (mm d⁻¹), EVI* é o *Enhanced Vegetation Index* ajustado e Tc (°C) é a temperatura.

Para os meses que apresentaram valores de ET negativos (janeiro, março, abril, maio, junho, novembro e dezembro), houve a necessidade de reclassificar os mesmos para valores acima de zero. A partir dessa etapa, foram gerados os mapas de ET por sazonalidade pela seguinte equação:

$$ET_s = \frac{\sum ET_m}{3} \quad (5)$$

Em que, ET_s é a evapotranspiração diária sazonal (mm d⁻¹) e ET_m é a evapotranspiração diária mensal (mm d⁻¹).

Método de Penman-Monteith FAO56

O boletim FAO56 de irrigação e drenagem (ALLEN; PEREIRA; RAES, 1998) sugerem o modelo de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura hipotética para a determinação da evapotranspiração de referência, na seguinte forma:

$$ET_o = \frac{0,408 s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (6)$$

em que, ET_o (mm d⁻¹) é a evapotranspiração de referência; Q_n (MJ m⁻² d⁻¹) é o saldo de radiação diário à superfície; G (MJ m⁻² d⁻¹) é o fluxo de calor no solo; T_{méd} [= (t_x + t_n)/2, °C] é a temperatura do ar média diária a 2 m de altura; u₂ (m s⁻¹) é a velocidade do vento média a 2 m de altura; e_s (kPa) é a pressão de vapor de saturação; e_a (kPa) é a pressão parcial de vapor de água do ar; s (kPa °C⁻¹) é a derivada da curva de pressão de saturação do vapor do ar no ponto de t_{méd} e γ (kPa °C⁻¹) é o coeficiente psicrométrico. Detalhes das determinações dos termos da equação 6 são apresentadas por Amorim et al. (2012).

4.4 Análise estatística

Com os valores sazonais de verão (dezembro – fevereiro), outono (março – maio), inverno (junho – agosto) e primavera (setembro – novembro) de ET estimados pelo modelo de Nagler et al. (2005) com base nos dados do sensor MODIS e os determinados pelo método de Penman-Monteith - FAO56 com os elementos meteorológicos observados nas EMS do INMET no ano 2003, foi avaliado o desempenho estatístico por meio do Viés Médio (VM) (Eq. 7), Erro Padrão da Estimativa (EPE) (Eq. 8), Coeficiente de Correlação (r) (Eq. 9), Coeficiente de Determinação (r²) (Eq. 10) e pelo Índice de concordância de Willmott (d) (Eq. 11).

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (7)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (11)$$

em que, P_i é o $i^{\text{ésimo}}$ valor estimado da ET pelo modelo de NAGLER et al. (2005), O_i é o $i^{\text{ésimo}}$ valor observado da ET, considerando no presente trabalho os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith FAO56, O é a média dos valores observados e N é o número de observações.

Os valores estimados foram obtidos por meio da média dos valores de ET dos pixels inseridos nos limites municipais, disponibilizados em formato *shapefile* pelo INEA. Com os limites municipais de cada EMS foram obtidos os valores médios mensais de ET. Essa metodologia foi adotada para que não houvesse nenhuma subestimativa ou superestimativa dos valores gerados pelo sensor, visto que a resolução dos pixels foi de 1 km.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores sazonais médios de ET obtidos por meio do sensor MODIS, apresentaram os seguintes índices estatísticos, $r^2 = 0,41$, $d = 0,38$, $EPE = 0,29 \text{ mm d}^{-1}$ e $VM = -0,04 \text{ mm d}^{-1}$, quando comparado com os dados observados na EMS de Resende (Tabela 1). Para a EMS de Maricá, os índices estatísticos dos valores sazonais médios de ET foram os seguintes, $r^2 = 0,78$, $d = 0,49$, $EPE = 0,13 \text{ mm d}^{-1}$ e $VM = -0,09 \text{ mm d}^{-1}$. Esses índices, indicaram melhor desempenho, com maior precisão (maior r^2) e acurácia (maior d e menor EPE), do modelo de Nagler et al. (2005) em Maricá em relação a Resende. Os municípios apresentam temperaturas do ar médias anuais distintas em função da altitude.

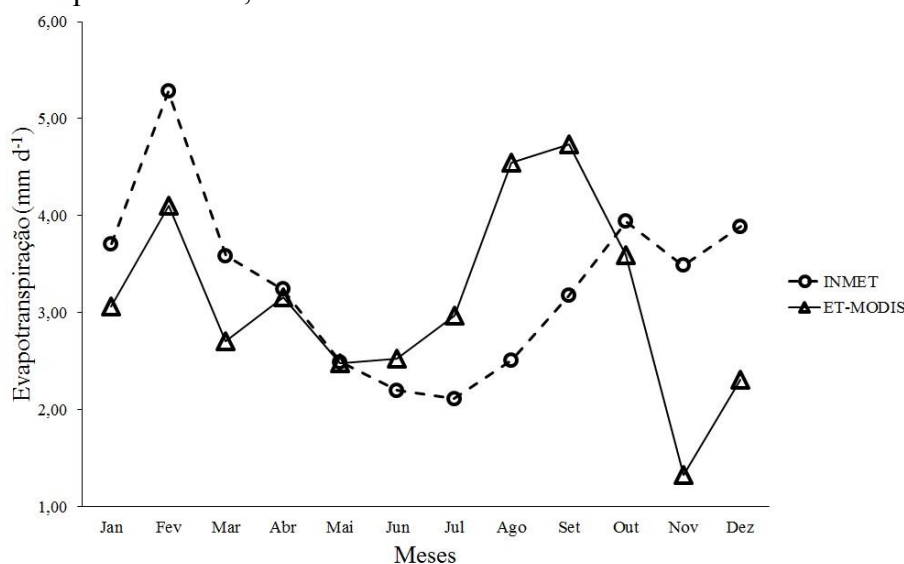
A maior proximidade de temperaturas do ar médias anuais do município de Maricá em relação às temperaturas de regiões áridas e semi-áridas de onde o modelo de estimativa da ET proposto por Nagler et al. (2005) foi implementado, pode explicar o seu melhor desempenho estatístico em relação à EMS de Resende. Além dessa característica, Maricá se encontra próximo ao ambiente costeiro, o que resulta em maior aporte de umidade para a atmosfera em relação a Resende durante todo o ano, similar ao que ocorre na região onde o modelo de Nagler et al. (2005) foi proposto, na margem das áreas do Middle Rio Grande River.

Tabela 1. Coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de concordância de Willmontt (d), erro padrão de estimativa (EPE) e viés médio (VM) da evapotranspiração média diária entre os métodos de Penman-Monteith FAO56 (PM-FAO56) e Nagler et al. (2005) (MODIS).

EMS	SAZONALIDADE	PM – FAO56 (mm d ⁻¹)	MODIS (mm d ⁻¹)	r^2	d	EPE (mm d ⁻¹)	VM (mm d ⁻¹)
Resende	Verão	4,29	3,16	0,41	0,38	0,29	-0,04
	Outono	3,11	2,78				
	Inverno	2,28	3,35				
	Primavera	3,53	3,22				
Maricá	Verão	4,74	3,56	0,78	0,49	0,13	-0,09
	Outono	3,35	3,19				
	Inverno	2,30	3,02				
	Primavera	3,91	3,14				

Na Figura 2 observa-se a proximidade entre as curvas de ET geradas a partir de dados de superfície por meio da equação de Penman-Monteith e da estimativa por meio de dados orbitais do sensor MODIS para Resende, com as menores diferenças entre os ET observados nos meses de janeiro a julho e outubro. Nos meses de abril e maio a diferença foi nula, entretanto, em novembro as diferenças foram máximas de 2,16 mm d⁻¹. O maior valor de ET estimada pelo método de Nagler et al. (2005) ocorreu em setembro (4,74 mm d⁻¹), enquanto em novembro foi observado o valor mínimo (1,33 mm d⁻¹).

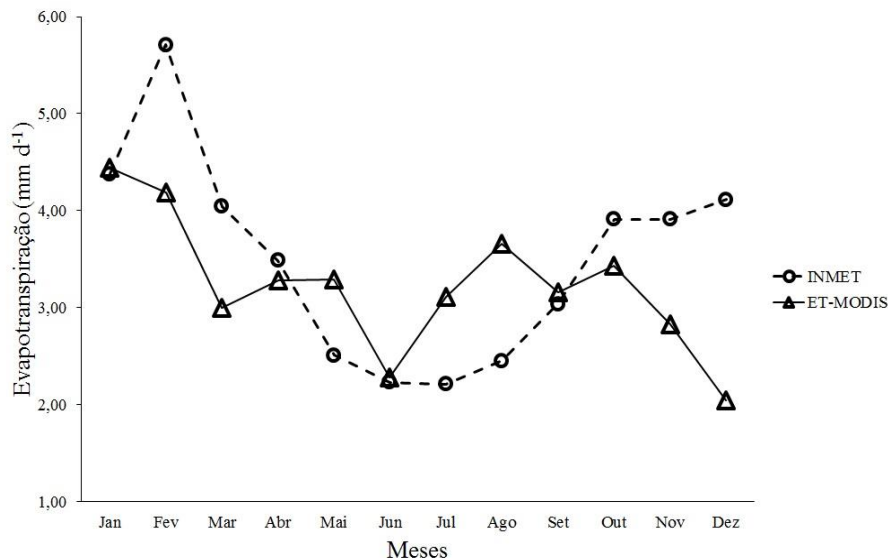
Figura 2. Variação dos valores observados e estimados de ET mensal ao longo do ano de 2003 para Resende, RJ.



A Figura 3 também apresenta curvas com tendências similares de ET entre os valores observados e estimados para Maricá. Os meses de janeiro, abril, junho e setembro apresentaram as menores diferenças (0,05 – 0,21 mm d⁻¹) entre ET PM-FAO56 e Nagler et al. (2005). Entretanto, em fevereiro, novembro e dezembro observaram-se as maiores diferenças nas estimativas de ET entre 1,08 mm d⁻¹ (novembro) e 2,07 mm d⁻¹ (dezembro). O maior

valor de ET obtida pelo sensor MODIS ocorreu no mês de janeiro ($4,44 \text{ mm d}^{-1}$) e a menor no mês de dezembro ($2,05 \text{ mm d}^{-1}$).

Figura 3. Variação dos valores observados e estimados de ET mensal ao longo do ano de 2003 para Maricá, RJ.



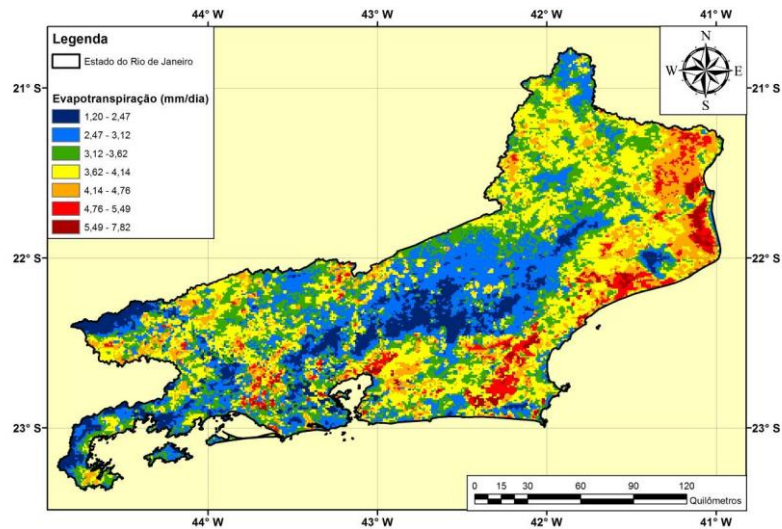
De acordo com RUHOFF (2011), os maiores erros na estimativa do saldo de radiação ocorrem na estação chuvosa, o que pode ser reflexo dos dias parcialmente nublados ou com presença de nuvens que não foram detectadas e corrigidas pelo sensor. No mesmo estudo, os valores de ET estimados pelo algoritmo SEBAL com imagens MODIS na região de Cerrado apresentaram variação média entre 6 mm d^{-1} na estação chuvosa (dezembro – fevereiro) e 2 mm d^{-1} na estação seca (junho – agosto).

A correlação foi baseada em valores observados de evapotranspiração de referência (ET_o) e de valores estimados de evapotranspiração real (ET_r), sendo assim, em ambas as EMS, observou-se o padrão de superestimativa na estação chuvosa e subestimativa na estação seca.

Outro fator que pode estar associado ao desempenho estatístico da ET para as EMS é em relação ao clima semi-árido do estado do Novo México, nos Estados Unidos, onde o modelo foi desenvolvido. Na comparação entre valores de ET estimados pelo modelo proposto por Nagler et al. (2005) e observados em EMS localizadas nas regiões norte e nordeste, Oliveira e Baptista (2011) mostraram que nas áreas as quais o clima é tropical semi-úmido ou equatorial, os coeficientes de determinação são baixos. Já as EMS localizadas em regiões semi-áridas apresentam maiores coeficientes.

Pela Figura 4, observam-se valores de ET para o verão de 2003, que variam entre $1,2$ e $7,8 \text{ mm d}^{-1}$, sendo que os valores mais elevados encontraram-se nas regiões leste e sudeste.

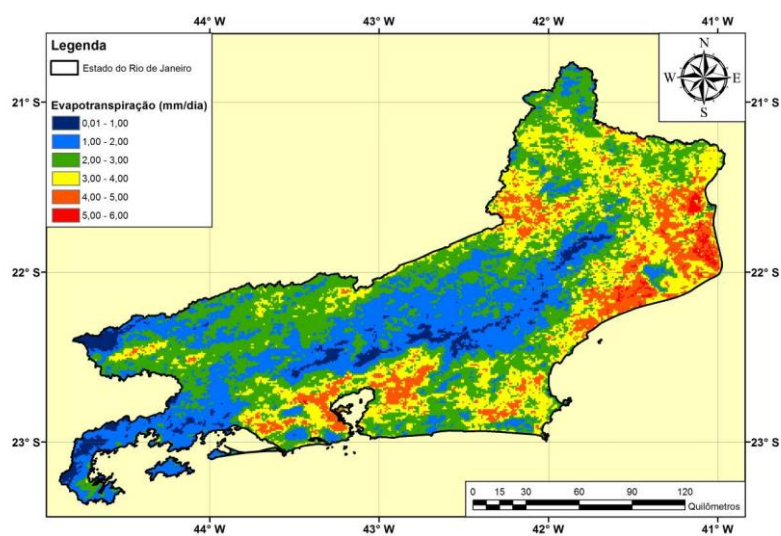
Figura 4. Distribuição espacial da ET média no estado do Rio de Janeiro para o verão do ano de 2003.



Valores inferiores a $3,12 \text{ mmd}^{-1}$ se concentraram na região central e extremo oeste do estado do Rio de Janeiro, cujas principais características são o relevo acidentado e altitudes elevadas. Pelo método Sebal, Giongo e Vettorazzi (2011) obtiveram resultados semelhantes na espacialização do Rn e ET na Bacia do Rio Corumbataí, SP, onde áreas agricultáveis, com espécies de menor albedo, apresentaram valores elevados de Rn e ET. As áreas com relevo mais acidentado, obtiveram valores inferiores de Rn e ET, em função da menor incidência de radiação solar. O mesmo estudo apresentou valores de ET que variaram de 5 a 7 mm d^{-1} , para o verão de 2009, e 4 a 6 mm d^{-1} para o verão de 2010. Em Kirindi Oya, Sri Lanka, Bastiaanssen e Bandara (2001) ao utilizarem o SEBAL em áreas agrícolas, obtiveram valores na ordem de $5,6 \text{ mm d}^{-1}$ para o verão do ano de 1997.

No outono (Figura 5), houve diminuição dos valores máximos de ET em relação ao verão. Nesse período, os valores de ET variaram entre 0,01 e $6,00 \text{ mm d}^{-1}$, sendo que os maiores valores de ET se concentram nas regiões leste e sudeste, mantendo padrão similar de distribuição do período anterior (Figura 5).

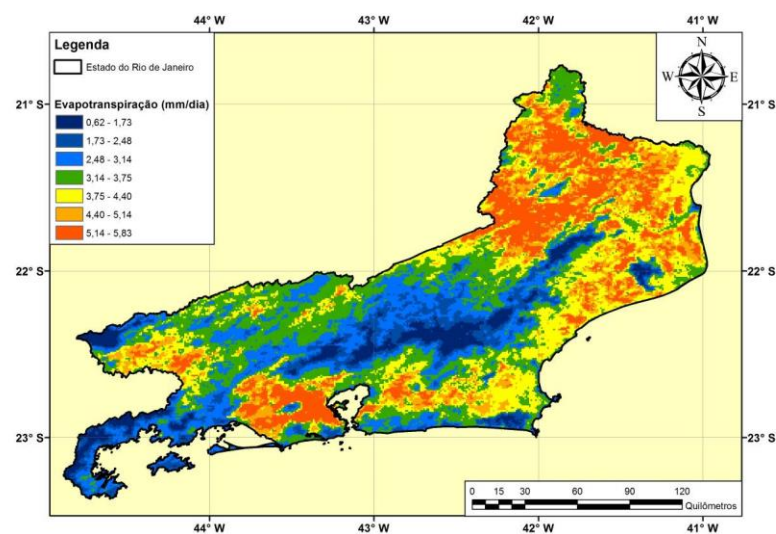
Figura 5. Distribuição espacial da ET média no estado do Rio de Janeiro para o outono do ano de 2003.



É possível observar valores de ET abaixo de $3,00 \text{ mm d}^{-1}$ se estendendo da região oeste a central do estado, ocupando uma área maior em relação ao período de verão. De maneira geral, a distribuição espacial da ET mostrou padrões similares para as estações de verão e outono, devido ao relevo e ocupação do solo, porém, em função da redução da disponibilidade hídrica e menor energia disponível no sistema, o outono apresentou menor amplitude e menores valores de ET.

Devido aos fatores de baixa disponibilidade hídrica e pouca energia no sistema, o período de inverno (Figura 6), apresentou os menores valores de ET do ano, variando entre $0,52$ e $5,83 \text{ mm d}^{-1}$.

Figura 6. Distribuição espacial da ET média no estado do Rio de Janeiro para o inverno do ano de 2003.

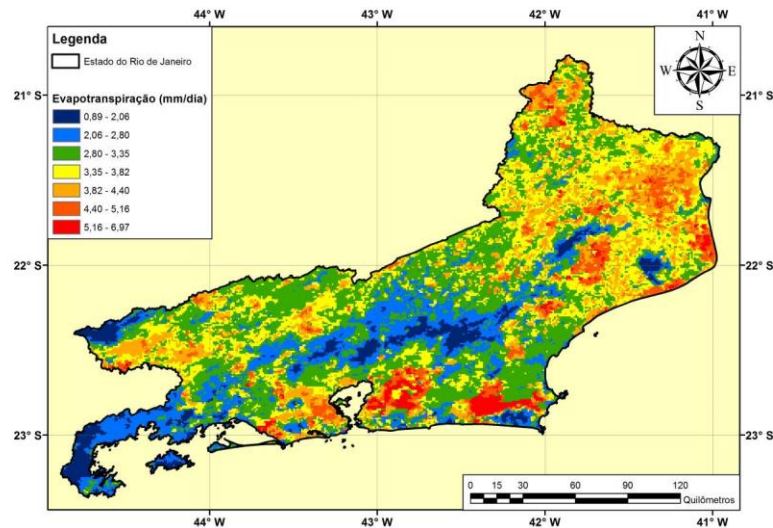


Constatou-se que os maiores valores de ET ocorreram na região norte, ocupada predominantemente por pastagens, e se estendendo pela região costeira de baixa altitude, composta por pastagens, agricultura e urbanização. Valores de ET abaixo de $3,14 \text{ mm d}^{-1}$ novamente se concentraram na região central e extremo oeste do estado. Estudos realizados por Giongo e Vettorazzi (2011) revelam que para a Bacia do Rio Corumbataí, o período de seca apresentou valores de ET entre $2,00$ e $5,00 \text{ mm d}^{-1}$.

No Sistema Aquífero Guarani, Rio Grande do Sul, Schirmbeck et al. (2009) aplicaram dados de LST obtidos pelo MODIS em um modelo simplificado da equação de Penman-Monteith, ajustado para o sensoriamento remoto. Neste estudo, os autores obtiveram valores aproximados de ET para os meses de julho e agosto do ano de 2009, variando entre $0,5$ e $4,0 \text{ mm d}^{-1}$.

Para o período de primavera (Figura 7) houve aumento dos valores de ET, com variação entre $0,89$ e $6,97 \text{ mm d}^{-1}$.

Figura 7. Distribuição espacial da ET média no estado do Rio de Janeiro para a primavera do ano de 2003.



Nessa época, ocorreu aumento da disponibilidade de energia, o que trouxe como resultado maiores precipitações e disponibilidade hídrica no sistema. A distribuição espacial da ET se manteve constante, onde os maiores valores ocorrem na região norte, onde além de maiores temperaturas, as pastagens e agricultura caracterizam um sistema água-solo-planta menos estável. As regiões com menores valores de ET se concentraram nas regiões central e extremo oeste, onde o relevo é mais acidentado e predomina vegetação mais densa, a qual consiste um sistema água-solo-planta mais estável.

Comparando os mapas de ET em função da sazonalidade, observou-se influência das estações chuvosas e secas por meio da disponibilidade de energia e hídrica no sistema, apresentando maiores e menores valores de ET, respectivamente. A distribuição espacial dos valores de ET manteve o mesmo padrão nas Figuras 4, 5, 6 e 7, onde os valores mínimos de ET se concentraram nas regiões central e sudeste e, os valores máximos na região nordeste do estado. Essa variação espacial está relacionada às características fisiográficas da área de estudo, onde o relevo, clima e vegetação influenciam diretamente nos valores de ET. Menezes et al. (2009) utilizaram o Modelo Digital de Elevação (MDE) no procedimento de aplicação do algoritmo SEBAL para as condições de relevo montanhoso de Minas Gerais. Os estudos

revelaram que de acordo com as feições de lago, vegetação e solo, os valores de ET podem variar em média de 0,47 mm h⁻¹ para relevos planos a 0,67 mm h⁻¹ para relevos montanhosos.

6 CONCLUSÕES

A análise estatística entre valores de ET observados pelas EMS e estimados pelo sensor MODIS apresenta índices satisfatórios, tornando o modelo aplicável para estudos hidrológicos em grandes áreas.

É importante que haja outras comparações com maiores quantidades de EMS e outros sensores, para levar em consideração outras resoluções espaciais e regiões do estado do Rio de Janeiro.

A subestimativa dos valores obtidos pelo sensor MODIS demonstra a necessidade de ajustes no modelo proposto por Nagler et al. (2005) para a sua melhor adequação em áreas com clima tropical e subtropical.

A distribuição espacial da ET para o estado do Rio de Janeiro apresenta maiores índices na estação chuvosa, com concentração na região nordeste, composta predominantemente por agricultura.

Os resultados deste estudo podem servir como subsídio para estimativas de produtividade de fitomassa, mudança da paisagem e demanda hídrica em sistemas agrícolas irrigados.

7 AGRADECIMENTOS

A *U. S. Geological Survey* (USGS) pela disponibilidade das imagens MODIS e a Universidade Federal do Rio de Janeiro pela disponibilidade do Laboratório de Sensoriamento Remoto Ambiental e Climatologia Aplicada - LSRACA para o processamento das imagens.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Rome, v. 1, n. 56, p. 297, 1998.

AMORIM, A.; LYRA, G. B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; SANTOS, R. D. B. Evapotranspiração de referência estimada por métodos baseados na temperatura do ar e radiação solar no Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil. In: REUNIÓN ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA, 14., 2012, Malargüe. **Anales...** Córdoba: Asociación Argentina de Agrometeorología - AADA, 2012.

ANDRÉ, R. G. B.; MARQUES, V. S. da.; PINHEIRO, F. M. A.; FERRAUDO, A. S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando-se valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 23, n. 4, p. 501-509, 2008.

BASTIAANSEN, W. G. M.; BANDARA, K. M. P. S. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. **Irrigation Science**, Germany v. 21, n. 1, p. 1-15, 2001.

BEZERRA, B. D.; SILVA, B. D.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

CEPERJ – Fundação Centro Estadual de Estatísticas Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. Título? Ano? Disponível em: <http://www.ceperj.rj.gov.br/ceep/info_territorios/divis_regional.html>. Acesso em: 08 jul. 2014.

CRUZ, C. B. M.; ROSÁRIO, L. D.; ABREU, M. D.; ALMEIDA, P. D.; VICENS, R. S.; CRONEMBERGUER, F. Classificação orientada a objetos na geração do mapa de uso e cobertura da terra do estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal. **Anais...** Natal: INPE, p. 7789-7796, 2009.

CUNHA, A. P. M. D. A.; ALVALÁ, R. C. D. S.; OLIVEIRA, G. S. D. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 28 n. 2, p. 139-152, 2013.

DELGADO, R. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, M. H.; SOARES, V. P.; ANDRADE, R. G. Classificação espectral de área plantada com a cultura da cana-de-açúcar por meio da árvore de decisão. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 32, n. 2, p. 369-380, 2012.

EMBRY, J.; NOTHNAGEL, E. Photosynthetic light-harvesting during leaf senescence in *Panicum miliaceum*. **Plant Science**, Ireland, v. 95, n. 2, p. 141-152, 1994.

ESTEVES, B. D. S.; MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNADO, S. Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Campos dos Goytacazes-RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 14, n. 3, p. 274-278, 2010.

FREITAS, D. M.; DELGADO, R. C.; RODRIGUES, R. A.; SOUZA, L. P. Variabilidade espaço-temporal na mudança da paisagem no município de Acrelândia, AC. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia-GO, v. 8, n. 1, p. 935-946, 2012.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento do saldo de radiação e evapotranspiração diária, por meio de imagens TM/LANDSAT-5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: MCT/INPE, 2011. p. 4663-4670.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdã, v. 83, n. 1, p. 195-213, 2002.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor modis: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, Brasília-DF, v. 6, n. 1, p. 91-121, 2003.

MARQUES, M. N.; COTRIM, M. B.; PIRES, M. A. F.; BELTRAME FILHO, O. Avaliação do impacto da agricultura em áreas de proteção ambiental pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, São Paulo. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 30, n. 5, p. 1171-1178, 2007.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MENEZES, S. J. M. C.; SEDIYAMA, G. C.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; ANDRADE, R. G. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo plano e montanhoso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 17, p. 491-503, 2009.

NAGLER, P. L.; CLEVERLY, J.; GLENN, E.; LAMPKIN, D.; HUETE, A.; WAN, Z. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdã, v. 94, n. 1, p. 17-30, 2005.

OLIVEIRA, M. R.; BAPTISTA, G. M. M. Validação do modelo espectral de estimativa de evapotranspiração na região de Gilbués, Piauí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: MCT/INPE, p. 5925-5932, 2011.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SCHIRMBECK, J.; SCHIRMBECK, L. W.; RIVAS, R.; COELHO, O. G. W. Estimativa de evapotranspiração em área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani desde imagens Modis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., Natal. **Anais...** Natal: INPE, p. 4859-4866, 2009.

ZHANG, Y.; XU, M.; CHEN, H.; ADAMS, J. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. **Global Ecology and Biogeography**, United States, v. 18, n. 1, p. 280-290, 2009.